

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Приладобудівний**

(повна назва інституту/факультету)

**Приладобудування**

(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»

УДК \_\_\_\_\_

(універсальна десятична класифікація.

Для визначення УДК конкретної дисертації

студенту слід звернутися в 1-й зал бібліотеки)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ **М.Д. Гераїмчук**

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ \_\_\_\_ ” грудня 2018 р.

**Магістерська дисертація  
на здобуття ступеня магістр**

зі спеціальності (спеціалізації) 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегрованої технології (комп'ютерно - інтегровані технології приладів точної механіки)  
(код і назва спеціальності)

На тему: \_\_\_\_\_ Віброплатформа зразкова \_\_\_\_\_

Виконав : студент (-ка) 2 курсу, групи \_\_\_\_\_ ПМ-71мп  
(шифр групи)

\_\_\_\_\_ **Данилевський Ярослав Ігорович**

(прізвище, ім'я, по батькові)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Науковий керівник \_\_\_\_\_ к.т.н. доцент Нечай Сергій Олексійович

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Консультант Розробка СТАРТАП-проекту к.е.н. доцент Бояринова К.О.

(назва розділу)

(посада, вчене звання, прізвище, ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Рецензент \_\_\_\_\_

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2018 року

**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»**

Факультет \_\_\_\_\_ Приладобудівний \_\_\_\_\_  
(повна назва)

Кафедра \_\_\_\_\_ Приладобудування \_\_\_\_\_  
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність(спеціалізація) 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології (комп'ютерно - інтегровані технології приладів точної механіки)  
(код і назва )

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ М.Д. Гераїмчук  
(підпис) (ініціали, прізвище)

« \_\_\_\_ » листопад 2018 р.

**ЗАВДАННЯ  
на магістерську дисертацію студенту**

\_\_\_\_\_ Данилевський Ярослав Ігорович \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації \_\_\_\_\_ Віброплатформа зразкова \_\_\_\_\_

науковий керівник дисертації к.т.н доцент Нечай Сергій Олексійович ,  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «05» листопада 2018 р. № 4078-с

2. Строк подання студентом дисертації 6 грудня 2018р

3. Об'єкт дослідження \_\_\_\_\_ Віброплатформа \_\_\_\_\_

4. Предмет дослідження: Здатність переміщуватись по двом осям; габаритні розміри робочої поверхні віброплити: 600мм x 600мм x 60мм; маса віброплити не більше 60 кг.; маса установки не більше 3500 кг.; діапазон відтворення синусоїдальних коливань плити , 0,01 ÷ 80 Гц.; границі допустимої відносної похибки частоти коливань плити  $\pm 0,01\%$ ; коефіцієнт нелінійних с

потворень 0,9%; інтерфейс обміну з ПК USB 2.0;

середній термін служби приладу не менше 10 років; робочі умови застосування: відносна вологість навколишнього середовища (30-80)%; температура оточуючого середовища  $(20 \pm 5)^\circ \text{C}$ ; напруга живлення АС 220 В, 50 Гц

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: 1. Огляд та аналіз матеріалів за темою магістерської дисертації. 2. Теоретичні та експериментальні дослідження: 2.1. Розробка математичної моделі об'єкту, що розробляється; 2.2. Експериментальні дослідження/моделювання (теоретичні дослідження) об'єкту; 2.3. Обробка отриманих результатів досліджень. 2.4. Аналіз отриманих результатів та висновки по адекватності розробленої моделі; 3.Стартап-проект; висновки; графічні матеріали.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного (графічного) матеріалу: Матеріали аналітичного огляду за темою магістерської дисертації – 1 аркуш формату А1; Схеми – 1 аркуш формату А1; Складальні кресленики – 1 аркуш формату А1; Графіки – 1 аркуш формату А1; Презентаційний аркуш – 1 аркуш формату А1.

7. Орієнтовний перелік публікацій \_\_\_\_\_

#### 8. Консультанти розділів дисертації\*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розробка СТАРТАП-проекту	к.е.н, доцент Бояринова К.О.		

#### 9. Дата видачі завдання 2 листопада 2018р

##### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Проведення огляду та аналізу об'єкта проектування	2 листопада – 20 листопада	
2	Проведення проектних та конструкторських розрахунків	17 листопада – 30 листопада	
3	Виконання графічної частини дисертації	20 листопада – 3 грудня	
4	Оформлення та подання дисертації	До 6 грудня	

Студент

\_\_\_\_\_  
(підпис)

\_\_\_\_\_  
(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

\_\_\_\_\_  
(підпис)

\_\_\_\_\_  
(ініціали, прізвище)

\* Консультантом не може бути зазначено наукового керівника

## Реферат

Магістерська дисертація складається з вступу, 3 розділів, висновків, списку літератури і додатків. Дисертація містить у собі 84 сторінки 19 таблиць, 53 рисунка, використаних джерел, та додатків.

Метою роботи є проектування і дослідження двох координатної віброплатформи для перевірки і калібрування сейсмометрів.

Об'єкт дослідження це віброплатформа з системою управління нанопереміщеннями.

Актуальність даної роботи стоїть у тому, що на даний момент в Україні відсутні атестовані віброплатформи для перевірки сейсмометрів, які зможуть перевіряти такі характеристики приладів, як чутливість, лінійність, частотні характеристики, нулі та полюси передаточних функцій.

Розроблено та досліджено двохкоординатну геофізичну віброплатформу із вимірювальною системою на основі лазерної інтерферометрії, яка приводиться у рух за рахунок п'єзоактюаторів. На основі розробленої платформи можна побудувати десятки пристроїв та систем, які будуть допомагати людям та компаніям виконувати їх роботу.

## **Abstract**

The master's dissertation consists of an introduction, 3 chapters, conclusions, a list of literature and appendixes. The thesis contains 84 pages of 19 tables, 53 drawings, sources used and applications.

The purpose of the work is to design and investigate two coordinate vibroplates for verification and calibration of seismometers.

The object of research is a vibro-platform with a control system of nanoparticles.

The urgency of this work is that at present in Ukraine there are no certified vibration plates for verification of seismometers, which will be able to check such characteristics of devices as sensitivity, linearity, frequency characteristics, zeros and poles of transfer functions.

The two-coordinate geophysical vibroplate form with a measuring system based on laser interferometry, which is driven by piezoactuators, is developed and investigated. Based on the developed platform, you can build dozens of devices and systems that will help people and companies perform their work.

### Зміст

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ .....	9
ВСТУП.....	10
1. Огляд та аналіз матеріалів за темою магістерської дисертації .....	12
1.1 «Волна ВС4» .....	12
1.2 Стенд для калібрування й випробувань сейсмометричної апаратури	13
1.3 Стенд для калібрування широкосмугових і короткоперіодичних сейсмометрів СТ-EW1 .....	16
1.4 Система для калібрування сейсмометрів РЕТ-0А і РЕТ-03 Н .....	18
1.5 Низькочастотні вібростенд.....	19
2. Теоретичні та експериментальні дослідження.....	21
2.1 Математична модель п'єзоелектричного двигуна. ....	22
2.2 Теоретичні та експериментальні дослідження об'єкту.....	24
2.2.1 Дослідження двохкоординатної геофізичної віброплатформи на основі лазерної цифрової інтерферометрії.....	24
2.2.2 Опис кінематичної схеми віброплатформи .....	25
2.2.3 Пристрій для вимірювання нанопереміщення вібростенду .....	27
2.2.3.1 Алгоритм обробки сигналів квадратурних каналів інтерферометра .....	28
2.2.3.2 Дослідження пристроїв стабілізації температури і потужності напівпровідникового лазера .....	35
2.2.3.3 Пристрій стабілізації потужності напівпровідникового лазера.	38
Пристрій був розроблений .....	38
2.2.3.4. Оптична схема інтерферометра Майкельсона із квадратурними вимірювальними каналами.....	40
2.2.3.4 Принцип дії горизонтального інтерферометра вібростенду .....	41
2.2.3.5 Цифровий сигнальний процесор для обробки сигналів квадратурних каналів інтерферометра .....	41

[illegible]

2.2.3.6 Розробка драйвера п'єзоактюатора віброплатформи.....	43
2.2.3.7 Юстировка оптичної схеми горизонтального інтерферометра вібростенду.....	45
2.2.3.8 Особливості роботи горизонтального та вертикального інтерферометрів вібростенду .....	46
2.2.4 Розробка конструкції вібростенду.....	47
2.2.4.1 Основа віброплатформи.....	48
2.2.4.2 Платформа .....	48
2.2.4.3 П'єзоактюатор .....	50
2.3. Обробка отриманих результатів досліджень.....	51
2.3.1 Розрахунок власної частоти коливань станини віброплатформи на пневмоопорі.....	51
2.3.2 Структурна схема процесу визначення частотних характеристик сейсмометричних приладів.....	53
2.3.3 Ідентифікація параметрів частотних характеристик сейсмометрів по експериментальним даним.....	55
2.3.4 Результати експериментальних досліджень та їх аналіз.....	59
2.4. Аналіз отриманих результатів та висновки по адекватності розробленої моделі.....	65
<b>3. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ .....</b>	<b>68</b>
3.1 Опис ідеї проекту .....	68
3.2 Технологічний аудит ідеї проекту .....	70
3.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап проекту .....	71
3.4 Розроблення ринкової стратегії проекту.....	76
3.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту .....	78
3.6 Висновки.....	81
Загальні висновки.....	82
Список використаної літератури. ....	83
Додатки	

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

АФЧХ – Амплітудно-фазова частотна характеристика;

АЦП – Аналогово-цифровий перетворювач;

АЧХ – Амплітудно-частотна характеристика;

ЗВТ – Засоби вимірювальної техніки;

ЛАЧХ – Логарифмічна амплітудно-частотна характеристика;

ЛЧХ – Логарифмічні частотні характеристики;

ЧХ - Частотні характеристики;

FFT – Швидке перетворення Фур'є.

					МД.ПМ71.25.000ПЗ	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



## ВСТУП

На сьогодні у всьому світі використовується значна кількість геофізичних приладів, а саме сейсмографи, гравіметри, георадари, каверноміри і т.п. У даній магістерській дисертації увага буде зосереджена на сейсмометрах. Даний прилад використовується для прогнозування сейсмічної обстановки, сейсмічної розвідки корисних копалин, моніторингом сейсмічної активності, контролем над гірничою діяльністю, тому наразі стоїть завдання у вдоскаленні сейсмометрів, але для того щоб вдоскалювати сейсмометри потрібна віброплатформа, на якій можна буде проводити іспити, калібрування і атестації даних сейсмометрів.

Проблемність цього питання полягає у відсутності в Україні атестованих прецизійних віброплатформ, які зможуть ідентифікувати такі параметри і характеристики приладу як:

- Чутливість;
- Лінійність;
- частотні характеристики;
- нулі і полюси передаточних функцій.

Платформи які відомі не використовують для атестації через незадовільні параметри або через відсутність державної атестації. Саме тому прилади які існують з радянських часів, або ті що придбали за кордоном не включаються у державний реєстр.

У зв'язку з новими вимогами до сейсмометрів, вони повинні бути прецизійними. При цьому для визначення лінійності, частотних характеристик, чутливості, нулів і полюсів передаточних функцій потрібно використовувати прецизійні вимірювальні пристрої переміщень із здатністю переміщуватись на рівні 1 нм.

Основна ідея при розробці нового каліброваного пристрою пов'язана з необхідністю об'єднати як вертикальне, так і горизонтальне переміщення платформи пристрою в одному варіанті конструкції апаратури. За рахунок великого розміру майданчика на ній можливе розміщення відразу близько 20

					МД.ПМ71.25.000ПЗ	Арк.
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сейсмометрів (для мікросейсмічних районування) для тестування їх технічного стану. Відсутність вертикального переміщення каліброваного пристрою у інших віброплатформ призводить до необхідності укласти вертикальні датчики набік і знімати з них пружину компенсації вертикального переміщення. В результаті цієї процедури виникає експериментальна помилка при розрахунку передавальної функції вертикальної складової сейсмометра. Однак такий варіант положення сейсмодатчики на горизонтальному калібрувальному пристрої дозволяє зробити тільки якісне тестування, т. є. перевірити, чи є серйозні технічні порушення в передавальній функції вертикальної складової чи ні. [1]

Тому, було прийнято рішення що потрібно розробити та виготовити двох координатну широкосмугову віброплатформу із використанням цифрової лазерної інтерферометрії. Вона буде забезпечувати дослідження (півірку і калібрування) вертикальних і горизонтальних сейсмометрів у автоматизованому режимі.

Фактично основи побудови полягали у наступному:

1. Для зменшення впливу коливань мас потрібно використання масивної основи
2. Застосування лазерного цифрового інтерферометричного вимірювача зміщень на основі напівпровідникового лазера.
3. Використання силових п'єзоактюаторів для виконання руху віброплатформи по вертикальній і горизонтальних осях.
4. Для автоматизації процесу дослідження геофізичних приладів потрібно використання сучасного програмного і математичного забезпечення.

					МД.ПМ71.25.000ПЗ	Арк.
						11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

# 1. Огляд та аналіз матеріалів за темою магістерської дисертації

## 1.1 «Волна ВС4»

Розглянемо вібростенд «Волна ВС4», який призначений для синусоїдального розхитування сейсмометрів, велосиметрів і акселерометрів із заданою амплітудою й частотою. Данний метод дозволяє калібрувати прилади по чутливості, визначати несправності типу затирань, заїдань і т.п. Датчик зміщення дозволяє досліджувати частотнофазові характеристики приладів.

Стенд містить у собі рухливий стіл, блок керування рухом вібростенда й генератор (Рис. 1).



Рис. 1 – Зображення вібростенду «Волна ВС4»

Дані із вбудованого індуктивного датчика зміщення і з виходів датчиків, що тестуються, збираються системою збору даних. Вібростенд може задавати як горизонтальні, так і вертикальні коливання частотою від 0 до 100Гц. У вібростенді застосований компенсований індуктивний перетворювач положення платформи в частоту. Для максимальної точності вимірів на високих частотах датчик зміщення може бути доповнений зовнішнім акселерометром[1].

					МД.ПМ71.25.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

Недоліком вібростенда «Волна ВС4» :

- необхідність установки на тверду горизонтальну поверхню, яка не буде розгойдуватися під впливом вібрації. Виробники рекомендують для кращої відтворюваності вимірів, на бетонному фундаменті закріпити горизонтально рівну металеву пластину, і закріпити платформу. При роботі на частотах вище 10 Гц платформу необхідно притягнути до пластини важелями з комплекту кріплення.
- можливість розгойдування платформи винятково синусоїдальним вхідним впливом.

## **1.2 Стенд для калібрування й випробувань сейсмометричної апаратури ( Крим)**

Розглянемо систему стенда для калібрування й випробувань сейсмометричної апаратури, що створена у лабораторії сейсмометрії кафедри механіки й сейсмостійкості споруджень КАПКС (Кримська академія природоохоронного й курортного будівництва). Система забезпечує калібрування сейсмоприймачів типу С-5-С, СМ-ЗКВ, ВЭГИК і т.п., для яких достатньо калібрування по горизонталі.

Даний стенд (Рис.2) був атестований Кримським центром стандартизації, метрології й сертифікації. Стенд складається з: вхідного підсилювача; підсилювача потужності; електродинамічних перетворювачів, сейсмоприймачів; індуктивного перетворювача; ємнісного перетворювача, попередніх підсилювачів; вихідних підсилювачів; аналого-цифрового перетворювача.

					МД.ПМ71.25.000ПЗ	Арк.
						13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рис.2 – Зображення станда для калібрування й випробувань сейсмометричної апаратури.

Основні технічні характеристики системи:

1. Вертикальні зміщення платформи станда становлять не більш 0,5 % від відповідної величини її горизонтального зміщення.
2. Площа платформи станда 500x500 мм<sup>2</sup>, його вантажопідйомність не менш 400 Н, що забезпечує можливість одночасних досліджень декількох каналів на ідентичність. У конструкції платформи передбачена можливість установки великогабаритних горизонтальних сеймоприймачів типу СГК, СТК-МЗ, СТКД і т.п..
3. Робочий частотний діапазон системи - 0.01-20 Гц.
4. Діапазон амплітуд зміщень платформи - до 1 мм.
5. Силловий привід платформи керується електричним сигналом гармонійної, квазісейсмічної або випадкової форми. [3]

					МД.ПМ71.25.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

Конструкція стенда представлена на Рис.3. Стенд складається з опорної рами (1), звареної зі сталевих швелерів. До опорної рами прикріплені кронштейни (2), на яких за допомогою чотирьох плоских сталевих пружини (3) підвішена рухлива платформа (4). Платформа призначена для установки сейсмоприймачів. На лицьовому торці платформи розміщені клеми (5) для підключення виводів сейсмоприймачів.

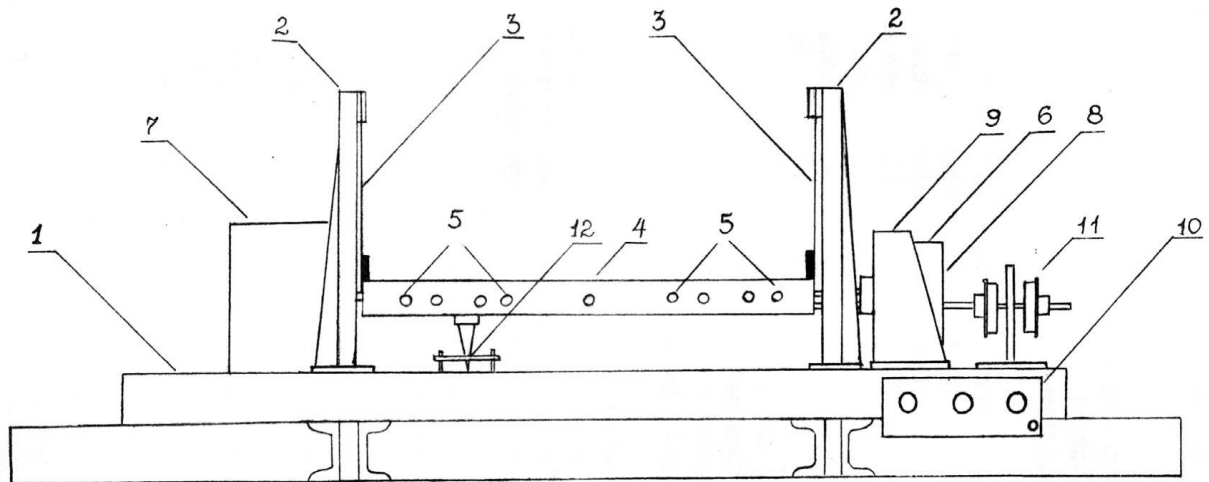


Рис. 3 – Схема стенда для калібровки сейсмічної апаратури

Платформа приводиться в рух чотирма електродинамічними приводами (6). Для запобігання від ушкодження й засмічення приводи закриті сталевими кожухами (7). (На рис. 1.1 один з кожухів не показаний). Кожний із приводів складається з постійного магніту (8), який за допомогою кронштейна (9) з алюмінієвого сплаву закріплений на опорній рамі (1). У кільцевому зазорі магнітної системи розміщена котушка електродинамічного приводу, яка жорстко з'єднана із платформою (4) за допомогою регульовальних механічних ланок.

На передній панелі розподільчої коробки (10) розташовано три роз'єми, за допомогою яких здійснюється підключення зовнішніх пристроїв керування й вимірювання. Стенд обладнаний пристроєм обмеження зміщення з амортизаторами для зм'якшення ударних навантажень, які можуть виникнути в процесі роботи при випадковому перевищенні допустимих амплітуд руху платформи (11). Це ж обладнання використовується для фіксації столу при

					МД.ПМ71.25.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

транспортуванні стенда. Стенд оснащено показчиком нульового положення платформи (12).

Переміщення платформи здійснюється за рахунок електричних струмів, що узгоджено поступають на обмотки котушок усіх чотирьох електродинамічних приводів стенда. Для виміру параметрів руху платформи стенд оснащено двома датчиками – індуктивним і ємнісним. Індуктивний датчик складається з постійного магніту, у зазорі якого розташована обмотка котушки. ЕДС, що знімається із цієї обмотки, пропорційна швидкості руху платформи щодо опорної рами. Ємнісний датчик, складається з вимірювальної головки й зовнішньої обкладки, закріпленої на платформі. Напруга, що знімається з вимірювальної головки, пропорційна переміщенню платформи щодо опорної рами[4].

Недоліками стенда:

- обмежений робочий частотний діапазон системи для калібрування й випробувань сейсмометричної апаратури
- калібрування сеймоприймачів тільки по одній горизонтальній координаті.

### **1.3 Стенд для калібрування широкосмугових і короткоперіодичних сейсмометрів СТ-EW1**

Розглянемо стенд СТ-EW1, який розроблений в Інституті геофізики Штутгартського Університету (Німеччина). Стенд СТ-EW1 (Рис.4) є високоточним електромеханічним обладнанням, яке використовується для калібрування широкосмугових, проміжних і короткоперіодичних сейсмічних датчиків. Завданням стенду СТ-EW1 є визначення абсолютного фактора перетворення з точністю не гірше  $\pm 1\%$ . Також СТ-EW1 дозволяє визначити відносну передаточну функцію сучасних сейсмометрів [5].

					МД.ПМ71.25.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

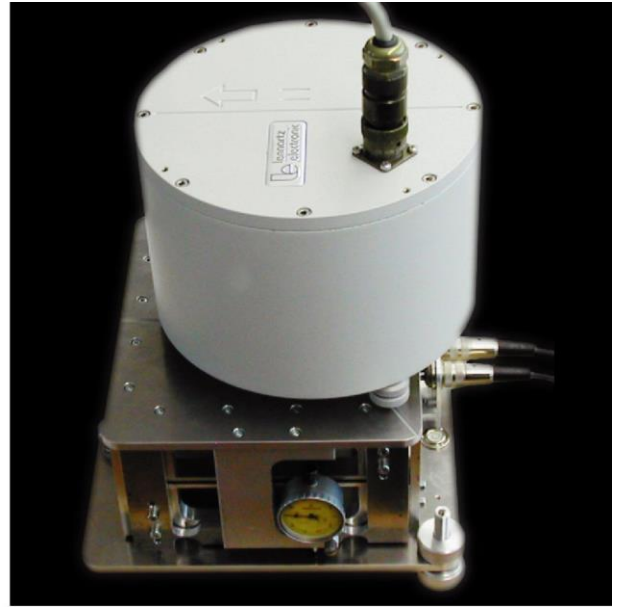
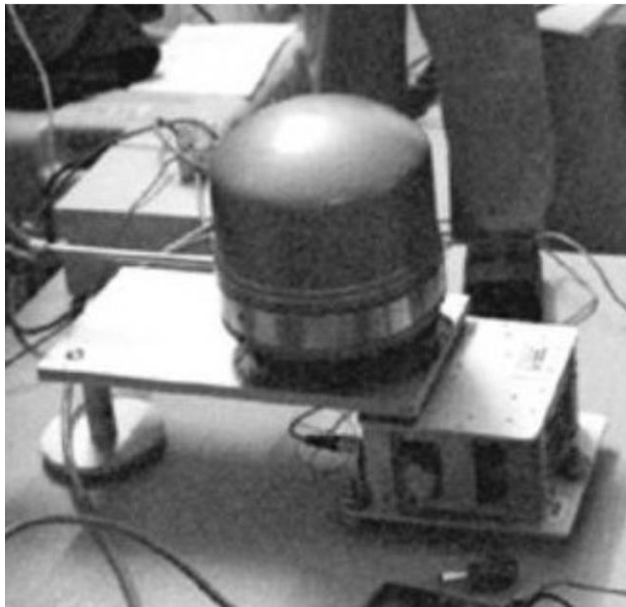


Рис.4 Зображення станда СТ-EW1

Принцип дії дуже схожий на роботу двигунів у старих автомобілях або мотоциклах з верхнім розташуванням клапанів. Розподільний вал, що обертається, перетворює безперервний обертотий рух у періодичний рух уверх-униз за допомогою ексцентрикових кулачків і штовхача.

Обертальний момент на валу створює електричний двигун. До осі вала кріпиться ексцентричний диск. Коли точка на колі диска стає "дискретною" в одному вимірі, то це призводить до синусоїдального руху угору-униз (Рис.5).

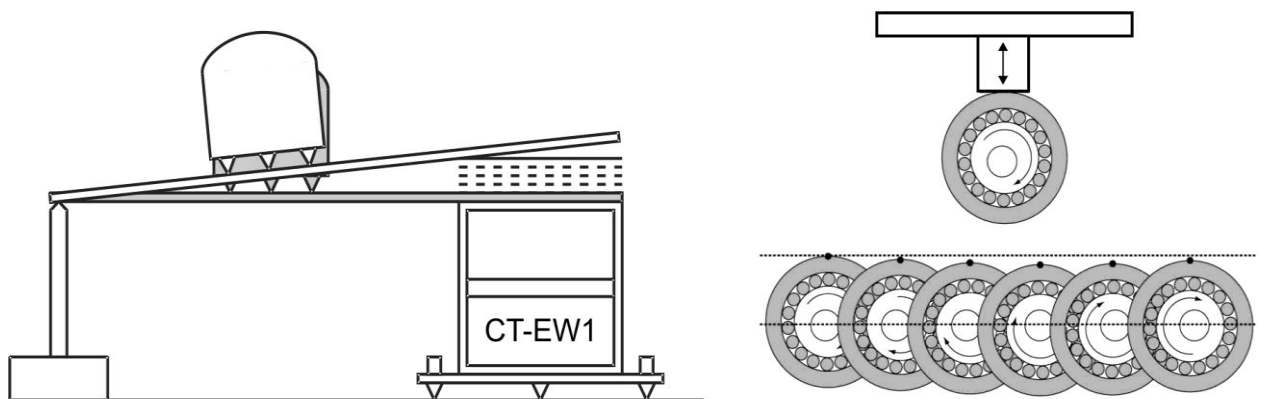


Рис.5 – Принцип дії станду СТ- EW1

СТ-EW1 оснащений двома різними дисками. Диск із високим ексцентриситетом використовується для вертикального калібрування, а диск із низьким ексцентриситетом більше підходить для горизонтального калібрування по нахилу. [6]

					МД.ПМ71.25.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17



Недоліками стенда СТ- EW1:

- обмежений робочий частотний діапазон системи
- неможливість проводити вимірювання реакції сейсмографа на вплив випадкових сигналів.

#### 1.4 Система для калібрування сейсмометрів РЕТ-0А і РЕТ-03 Н

Розглянемо систему для калібрування сейсмометрів РЕТ-0А і РЕТ-03Н виробництва IMV CORPORATION (Японія). Система калібрування складається з компактного електродинамічного стенда РЕТ-03Н і підсилювача з генератором РЕТ-0А (Рис.6). Система може імітувати землетрус і дозволяє легко проводити калібрування сейсмометрів. Головною її особливістю є мобільність, тому що, горизонтальний вібростенд має невеликий розмір і малу вагу .



Рис.6 – Зображення стенда для калібрування сейсмометрів РЕТ-0А і РЕТ-03Н

Специфікація вібростенда:

- збудлива сила, 29.4Н;
- максимальне прискорення, 10м/сек<sup>2</sup>;
- частотний діапазон, 0-150 Гц;
- максимальне навантаження, 15кг. [7]

					МД.ПМ71.25.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

Недоліком є неможливість перевірки сейсмометрів на низьких частотах, тому що датчик збудження є електродинамічного типу.

### 1.5 Низькочастотні вібростенд

Мета винаходу - підвищення продуктивності випробувань шляхом регулювання частоти коливання без зупинки вібростенда.

Поставлена мета досягається тим, що в низькочастотному вібростенді, що містить основу, збудник коливань, сполучену з ним віброплатформу, стійки, шарнірно з'єднані з віброплатформою і підставою і утворюють з віброплатформою паралелограмний механізм, пружний підвіс віброплатформи, пружні елементи якого розташовані з протилежних сторін віброплатформи перпендикулярно осі вібрації і з'єднані одними кінцями з віброплатформою через пружний шарнір, і кошти, регулювання жорсткості пружного підвісу, пружні елементи розташовані по різні боки від осі вібрації віброплатформи, а засоби регулювання жорсткості пружного підвісу виконані у вигляді пристроїв для натягу пружних елементів, з'єднаних з другими кінцями пружних елементів.

Для забезпечення малої величини збільшення жорсткості до величини приросту переміщення пристрою натягу, в цьому вібростенді підвіс містить чотири пружних елементи у вигляді циліндричних пружин, встановлених попарно по різні боки від осі вібрації, а пристрій для натягування кожної пари пружних елементів виконано у вигляді двох шківів із закріпленою на кожному з них гнучкою стрічкою, з'єднаної з другим кінцем пружини, і закріплених на одних валах зі шківками двох черв'ячних коліс, зачіпляються з загальним приводним черв'яком.

Завдяки такому розташуванню пружних елементів і виконання засобів регулювання жорсткості забезпечується плавне регулювання жорсткості пружного підвісу на ходу, а при натягу пружних елементів не виникає істотних

					МД.ПМ71.25.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

зусиль, що діють на рухому систему вібростенда, а отже, кутових і поперечних коливань.

На кресленні (Рис.7) схематично представлений пропонований низькочастотний вібростенд.

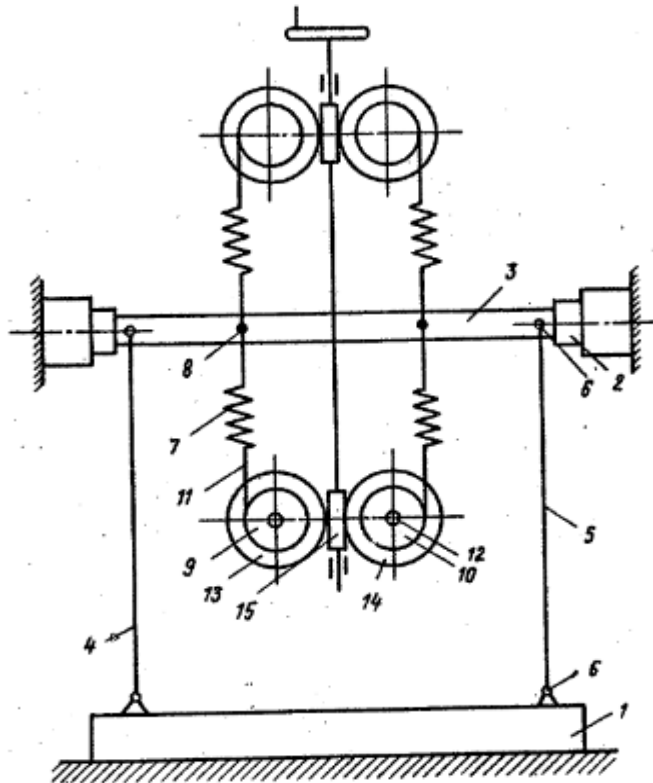


Рис.7 Низькочастотний вібростенд

Низькочастотний вібростенд містить основу 1, збудник коливань 2, з'єднану з ним віброплатформу 3 для установки виробу (не показано), стійки 4 і 5, шарнірами 6 з'єднані з віброплатформою 3 і основою 1 і утворюють з віброплатформою 3 паралелограмний механізм, пружний підвіс віброплатформи, пружні елементи якого виконані у вигляді чотирьох циліндричних пружин 7, розташованих попарно з протилежних сторін віброплатформи 3 і по різні боки від неї, перпендикулярно осі вібрації і з'єднаних одними кінцями з віброплатформою 3 через пружний шарнір 8. Стенд містить також засоби регулювання жорсткості пружного підвісу, виконані у вигляді пристроїв

для натягу кожної пари пружних елементів, кожне з яких включають два шківів 9 і 10 із закріпленою на кожному з них гнучкою стрічкою 11, з'єднаної з другим кінцем пружини 7, і закріплено на одних валах 12 зі шківів 9 і 10 двох черв'ячних коліс 13 і 14, з ачіпляються із загальним приводним черв'яком 15. [8]

Недоліками стенда:

- обмежений робочий частотний діапазон системи для калібрування й випробувань сейсмометричної апаратури
- калібрування сейсмоприймачів тільки по одній горизонтальній координаті.

## 2. Теоретичні та експериментальні дослідження

Аналіз існуючих віброплатформ показав, що в них, в якості механізмів збудження платформи використовуються:

- індуктивні перетворювачі,
- електродинамічні перетворювачі
- за допомогою ексцентрикових кулачків і штовхача.

Головним недоліком цих типів перетворювачів є неможливість роботи на дуже малих амплітудах збудження –  $< 1$  мкм.

Головною проблемою для досягнення високої точності формування механічних впливів на віброплатформу є протиріччя між його потужністю і масою рухомої частини механізму. Тому було проаналізовано доцільність застосування традиційного електромагнітного та п'єзоелектричного механізму приводу.

Попередній аналіз літератури [9...13] свідчив про те, якщо ми застосуємо саме п'єзоелектричний привід, то получимо значне покращення динамічних властивостей рухомої частини. Тому, після теоретичних та експериментальних досліджень, ми отримали граничні залежності постійних часу від маси рухомої частини для електромагнітного та п'єзоелектричного механізмів фокусування.

Розрахунок залежності  $Tr(m)$  виконано для двигуна Р-239 із п'єзоматеріалу HVPZT, довжиною 100 мм [14] із використанням методики (Рис. 8). [15]

					МД.ПМ71.25.000ПЗ	Арк.
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Результати розрахунку свідчать про те, що з точки зору швидкодії потенціальні можливості п'єзомеханізму можуть бути більш ніж на порядок кращими. Якщо збільшити масу рухомої частини до 100кг, то будемо спостерігати такі ж залежності. Але необхідно відмітити що є негативні властивості п'єзоприводів нанопереміщень такі як наявність нелінійності параметричної моделі та гістерезис статичної характеристики.

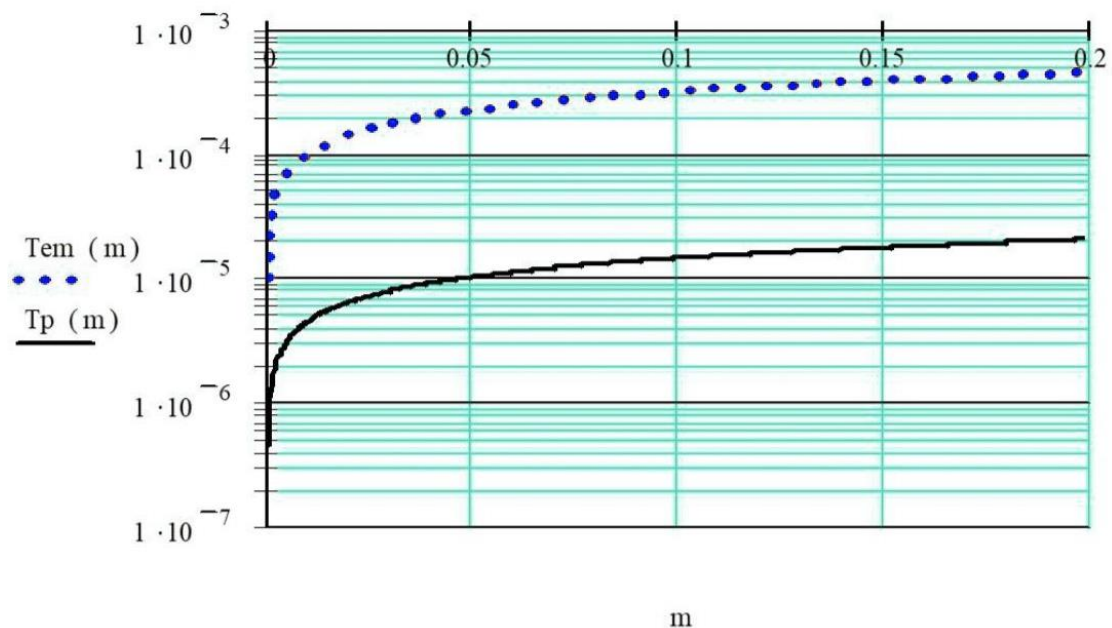


Рис.8 Співвідношення постійних часу електромагнітного  $T_{em}$  та п'єзоелектричного  $T_p$  механізмів приводу

Відмічені недоліки які впливають на стійкість та точність системи управління п'єзодвигуном мають бути предметом окремого дослідження. [15]

## 2.1 Математична модель п'єзоелектричного двигуна.

Відомо, що при реалізації системи управління на основі п'єзоелектричного двигуна, він піддається попередньому пружному стисканню, що впливає на його параметри математичної моделі. Якщо це зовнішнє діяння буде єдине, то структурна схема двигуна буде виглядати, так як зображено на Рисунку 9.

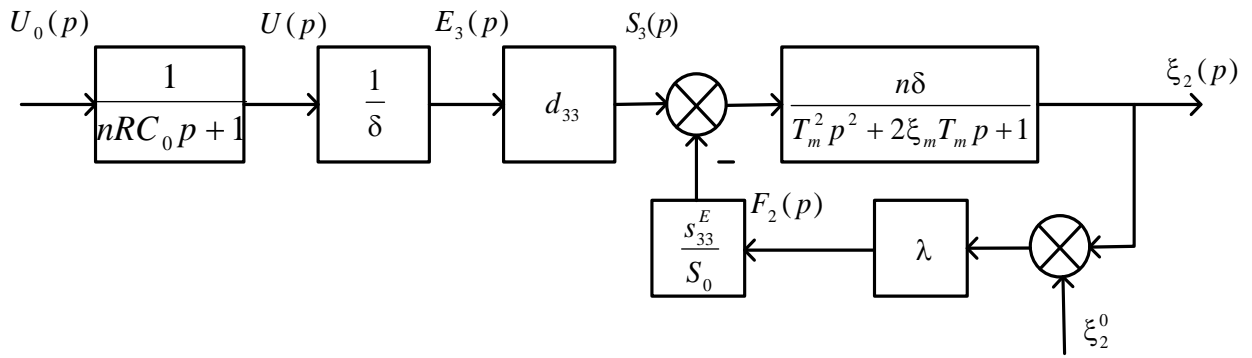


Рис.9 Схема складеного із  $n$  пластин п'єзодвигуна після стискання на величину  $\xi_2^0$

Після перетворення схеми отримаємо:

$$\xi_2(p) = \frac{k_c}{(T_e p + 1)(T_c^2 p^2 + 2\xi_c T_c p + 1)} U_0(p) - \frac{k_l}{T_c^2 p^2 + 2\xi_c T_c p + 1} \xi_2^0, \quad (1)$$

$$\text{де } k_c = \frac{d_{33} n}{1 + \lambda \frac{s_{33}^E}{S_0} n \delta}; \quad T_c = \frac{T_m}{\sqrt{1 + \lambda \frac{s_{33}^E}{S_0} n \delta}}; \quad \xi_c = \frac{\xi_m}{\sqrt{1 + \lambda \frac{s_{33}^E}{S_0} n \delta}} - \text{коефіцієнт}$$

$$k_l = \lambda \frac{s_{33}^E}{S_0} \frac{n \delta}{1 + \lambda \frac{s_{33}^E}{S_0} n \delta} - \text{коефіцієнт протидії стисканню};$$

$$T_e = nRC_0 - \text{електрична постійна часу двигуна.}$$

Аналізуючи вираз (1) можна зробити наступні висновки:

1. При стисканні п'єзодвигуна відбувається зменшення його коефіцієнта підсилення, коефіцієнта згасання та постійної часу. Зменшення коефіцієнта підсилення можна компенсувати за рахунок електронної системи.

2. Механічне пружне стискання доцільно компенсувати шляхом подачі по окремому каналу підпірної напруги  $U_0^0$ , яка розраховується із умови  $k_c U_0^0 = k_l \xi_2^0$ . Це дасть змогу підвести робочу точку до середини однополярної гістерезисної характеристики і отримати прикінцеву математичну модель п'єзодвигуна із джерелом живлення у вигляді

$$K_m(p) = \frac{\xi_2(p)}{U_0(p)} = \frac{k_c}{(T_e p + 1)(T_c^2 p^2 + 2\xi_c T_c p + 1)} \quad (2)$$

3. З точки зору усталених похибок система управління з п'єзодвигуном буде статичною. Виходячи з того, що закон зміни вхідних діянь на віброплатформу є досить складним, із наявністю значної кількості похідних, необхідно максимально підвищувати порядок астатизму такої системи[15].

## 2.2 Теоретичні та експериментальні дослідження об'єкту.

### 2.2.1 Дослідження двохкоординатної геофізичної віброплатформи на основі лазерної цифрової інтерферометрії.

Зважаючи на те, що приводи вертикального і горизонтального каналів не повинні працювати одночасно, то очевидно можна використовувати такі елементи як задавальний пристрій, підсилювач потужності і регулятор . Із врахуванням цього схему системи управління вібростендом можна надати у такому вигляді(Рис.10)

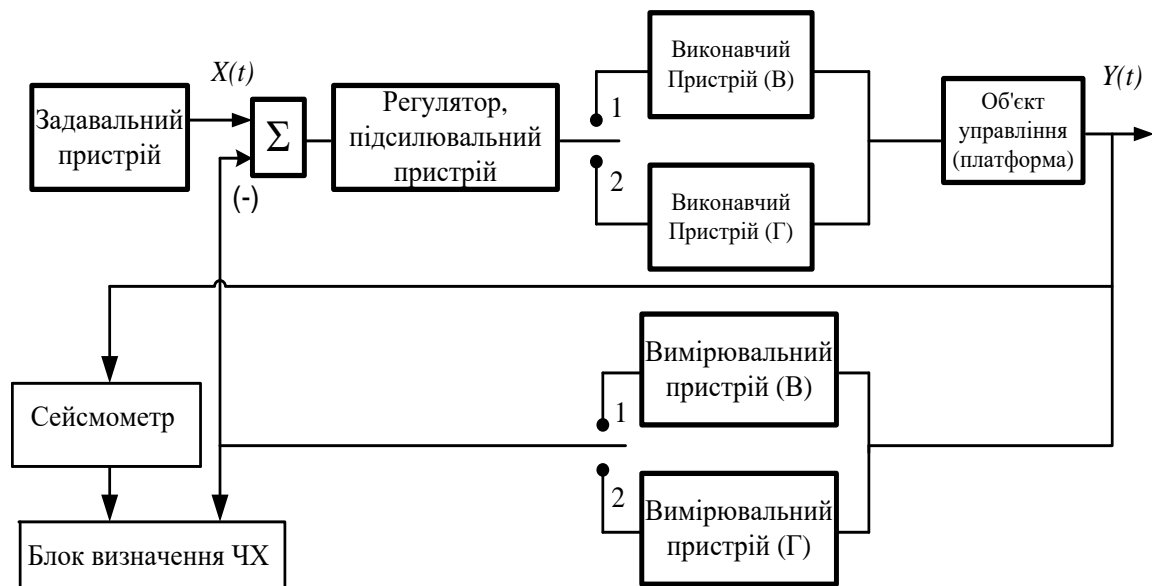


Рис.10 Узагальнена структурна схема системи управління вібростендом.

У положенні 1 працює вертикальний канал віброплатформи, а положенні, у положенні 2 – горизонтальний. [23]

### 2.2.2 Опис кінематичної схеми віброплатформи

Згідно з вимогами до магістерської дисертації пристрій повинен забезпечувати переміщення столу по двох координатах:  $z$  і  $x$ .

Робота по кожній з координат повинна буде відбуватись окремо. Якщо відбувається переміщення по  $z$ , то по  $x$  переміщення немає, і навпаки.

Розглянемо схему по вертикальному напрямку  $z$  (Рис.11) і по горизонтальному  $x$  (Рис.12).

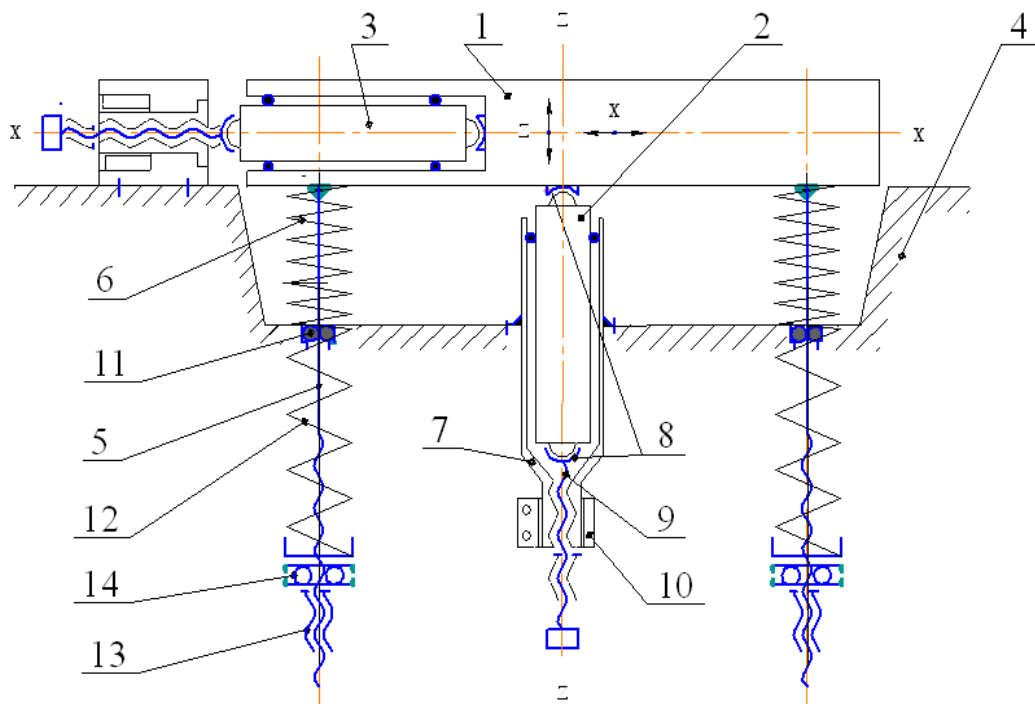


Рис.11 Кінематична схема віброплатформи

Основа пристрою – масивна чавунна станина 4 масою 3,4 тони. Плита 1 лежить на чотирьох пружинах 6, розташованих по кутах. Уздовж центральної осі  $z$  стола встановлений п'єзоактюатор вертикального переміщення 2, який знаходиться в товстостінній гільзі 7, яка жорстко закріплена на станині. У гільзі розташовано кільце з пружного матеріалу яке відцентровує п'єзоактюатор.

На двох торцевих поверхнях п'єзоактюатору є жорстко закріплені півсфери, які контактують з підп'ятниками 8 сферичної форми, з антифрикційного матеріалу, які знаходяться на столі і на упорному гвинті 9 та утворюють два сферичні шарніри. Упорним гвинтом п'єзоактюатор



притискається до столу до щільного контакту. Фіксується гвинт від відкручування за допомогою хомута 10.

Подальший притиск стола до п'єзоактюатора здійснюється за допомогою чотирьох тяг 5 і пружин стискання 12. Стискання цих пружин здійснюється гайками 13. Підшипники кочення 14 використовуються для зменшення тертя при затягуванні. Тяги, проходячи через отвори в станині обтискуються демпфуючими кільцями 11. Тяги є гнучкими стержнями.

Розглянемо кінематичну схему по координатах  $x$ :

П'єзоактюатор 3 розташований уздовж осі  $x$  і знаходиться в проточеному отворі, у середині столу, де він центрується двома пружними кільцями. Кріплення горизонтального п'єзоактюатора таке саме як і у вертикального. Півсфери з'єднані антифрикційним матеріалом. П'єзоактюатор підтискується до щільного контакту зі столом упорним гвинтом 22, після чого гвинт фіксується від відкручування хомутом 16 шляхом здавлювання розрізної гайки 15. У свою чергу, розрізна гайка з'єднана з брусом 21, який закріплений на станині.

За допомогою системи шпильок 17, пружин стискування 18 і гайок підтискних 19 здійснюється регулювання притиску п'єзоактюатора до столу. Шпильки є гнучкими стержнями, жорстко закручені у плиту.

По краях плити, з обох сторін, є опори ковзання 20 з антифрикційного матеріалу які і виконують роль направляючих. Вони розташовані так, що не дають можливості переміщуватись плиті в інших координатах окрім  $z$  і  $x$ .

					МД.ПМ71.25.000ПЗ	Арк.
						26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

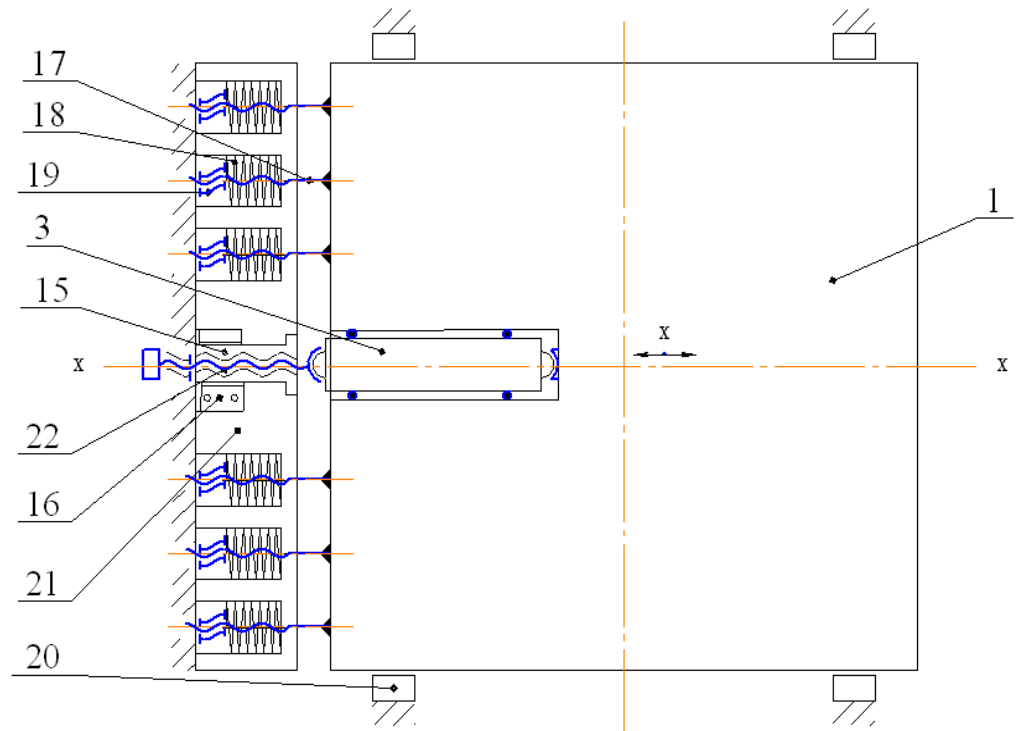


Рис.12 Кінематична схема віброплатформи ( координата  $x$ )

Для зменшення взаємного впливу елементів пристрою один на одного при роботі, вони зроблені так, щоб протидію переміщенням було зведено до мінімуму. Ці елементи –шпильки. У випадку, якщо рух столу здійснюється за їх координатою то вони працюють тільки на розтяг, а елементи не працюючої координати крім розтягування будуть ще відчувати деформації вигину. Тому вони виконані з гнучких стрижнів , що мають малу згинальну жорсткість.

Що стосується п'єзоактуаторів, один з них переміщує стіл, а другий, який непрацює, здійснює пасивні поперечні коливальні рухи. Завдяки двошарнірної конструкції з'єднання, а також використанню в опорах шарнірів антифрикційного матеріалу, з малим коефіцієнтом тертя, п'єзоактуатори роблять дуже малий опір переміщенням.

### 2.2.3 Пристрій для вимірювання нанопереміщення вібростенду

Для переміщення плити вібростенду розроблена замкнута система автоматичного управління, у якій пропонується використати лазерний інтерферометричний вимірювач відстані як вимірювальний елемент. Фактично

					МД.ПМ71.25.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

буде використовуватись інтерферометр Майкельсона з алгоритмом цифрової обробки сигналів квадратурних каналів.

### 2.2.3.1 Алгоритм обробки сигналів квадратурних каналів інтерферометра

Застосування такого алгоритму дозволить отримати відносне зміщення кутового відбивача інтерферометра у цифровому вигляді в діапазоні відстаней  $0 \leq \Delta l \leq l_0$ , де  $l_0$  - довжина когерентності променя лазера.

У найбільш загальному вигляді структурна схема пристрою зображена на рис. 2.8. Вона базується на використанні загальновідомого виразу

$$x(t) = \frac{\lambda}{4\pi} \arctg \frac{U_s(t)}{U_c(t)}, \quad (3)$$

де:

$U_s(t)$ ,  $U_c(t)$  – квадратурні сигнали інтерферометра;

$\lambda$  – довжина хвилі лазера. [16]

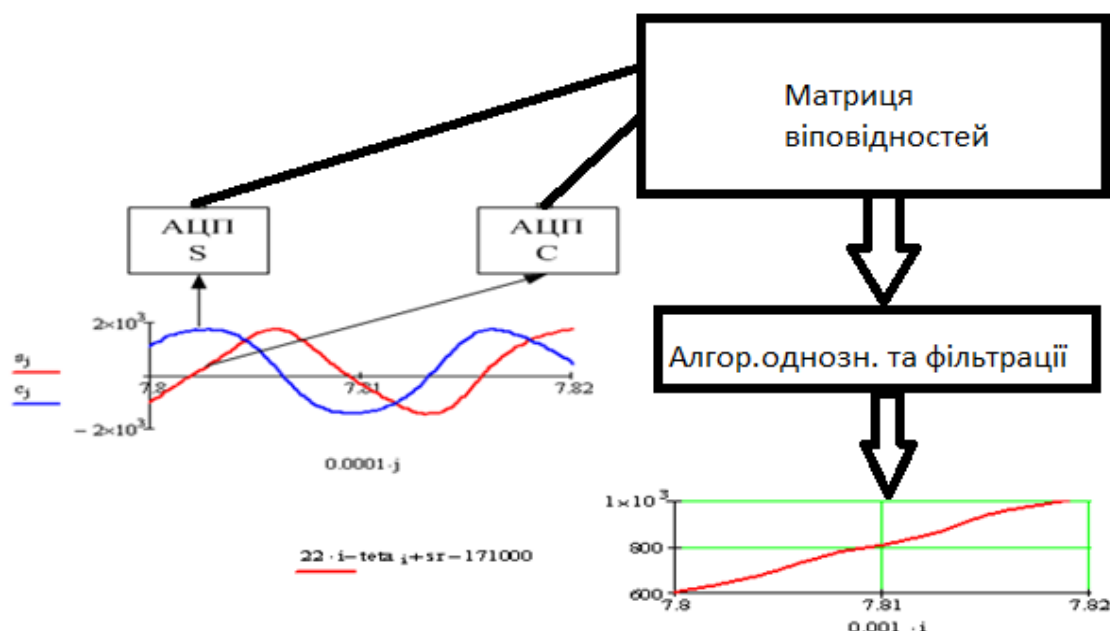


Рис. 13- Структурна схема лазерного інтерферометричного вимірювача відстані

Із виразу (3) слідує очевидне твердження: *кожній парі квадратурних сигналів інтерферометра у даний момент часу  $t$  однозначно відповідає координата  $x(t)$  на відрітку  $0 < x(t) < \lambda/2$* . Саме ці відповідності розраховані попередньо (Рис.13). При переході зміщення через значення  $\lambda/2$  настає неоднозначність відліку. Для усунення неоднозначності запропоновано алгоритм підрахунку кількості пройдених проміжків зміщення  $\tau = \lambda/2$ , сутність якого полягає у визначенні знаку змін відліків, які відрізняються на  $\tau/2$ , що зображено на Рис. 14.

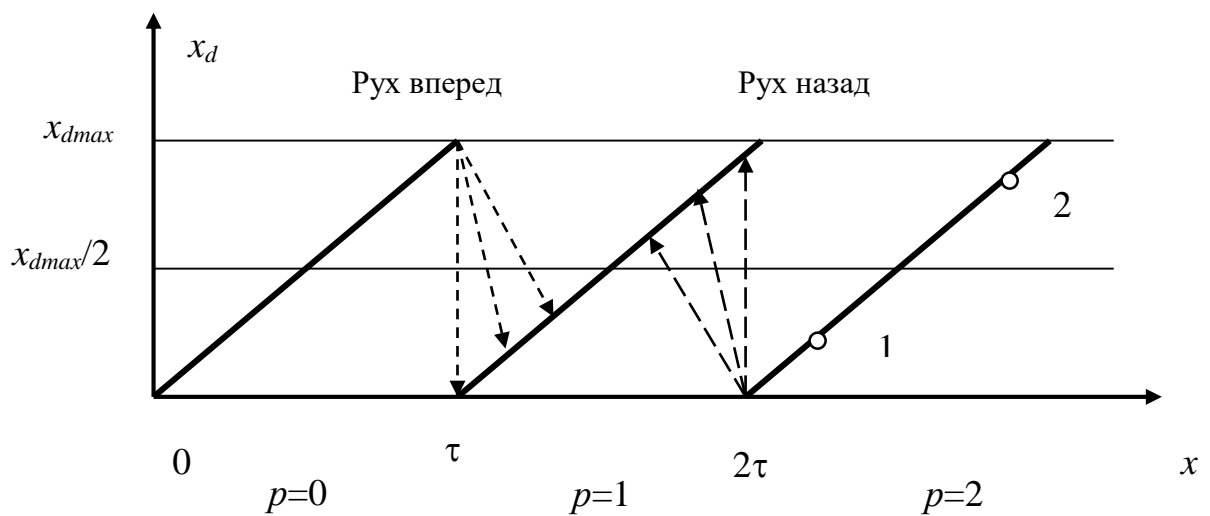


Рис.14 - До пояснення принципу усунення неоднозначностей визначення координат.[23]

Із урахуванням вищевикладеного структурна схема цифрового лазерного інтерферометра зображена на Рис.15.

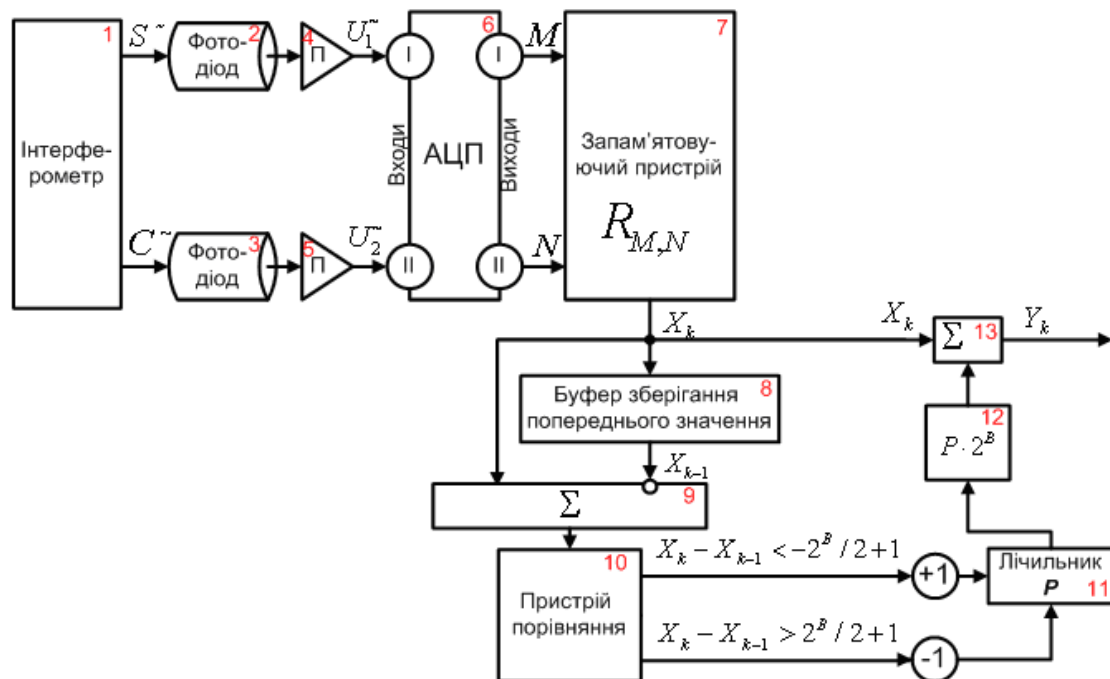


Рис.15 - Структурна схема цифрового лазерного інтерферометра

Необхідно вказати на обмеження, які полягають в обмеженні максимальної швидкості руху об'єкту, при якій можливе однозначне вимірювання його зміщення. Обмеження максимальної швидкості руху об'єкту, при якій можливе однозначне вимірювання зміщення, пов'язане з максимальною частотою дискретизації вихідних сигналів інтерферометра. Так, із Рис.14 слідує, що коли під час руху вперед два послідовних моменти дискретизації припадуть на точки, відстань між якими більша, ніж  $\tau/2$  (точки 1 і 2), виникає неоднозначність виміру відстані, оскільки при цьому виконується умова руху назад. Таким чином, неоднозначність виміру відстані настає при виконанні умови:

$$VT > \tau/2, \text{ або } V > \tau/2T, \quad (4)$$

де:

$V$  – швидкість руху;

$T$  – період дискретизації і обробки сигналів.

Це означає, що, наприклад, при частоті дискретизації 100 кГц і  $\lambda=637$  нм отримуємо  $V_{\max} = 7,96$  мм/с. Стосовно вимірюваних коливань віброплатформи отримаємо залежність, зображену на Рис.16.

					МД.ПМ71.25.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

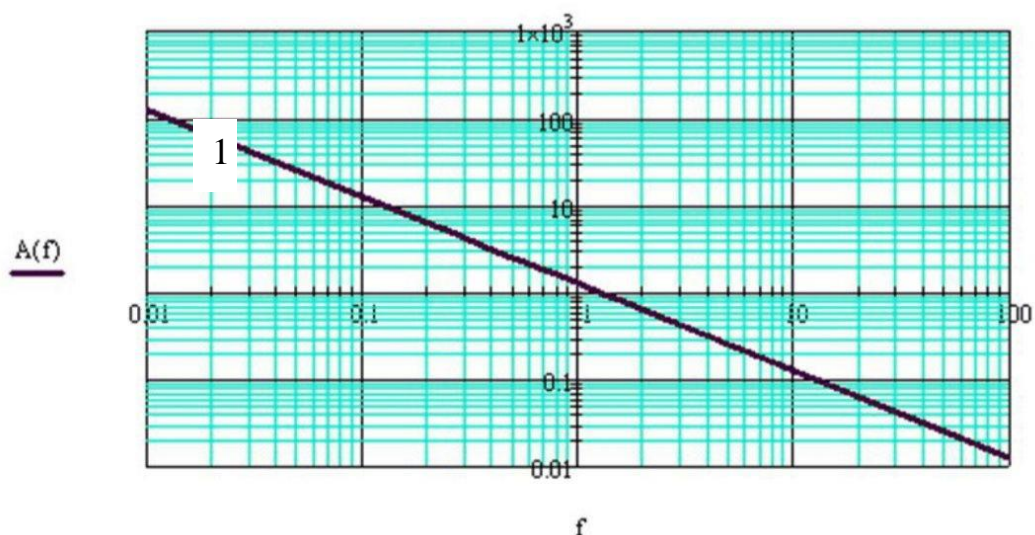


Рис.16 – Співвідношення амплітуди (мм) і частоти (Гц) вимірюваних коливань інтерферометром при частоті дискретизації 100 кГц

Це означає, що коливання у верхній напівплощині відносно лінії 1 адекватно вимірюватися не будуть. Звичайно, можливим шляхом вирішення цієї проблеми може бути збільшення частоти перетворення АЦП на один – два порядки, але це призведе до значного збільшення їх вартості. У ході виконання проекту для вирішення проблеми однозначного вимірювання зміщень із високими швидкостями була розроблена нова схема цифрового інтерферометра [18]. Основною відмінністю схеми є те, що задача визначення кількості проміжків  $\lambda/2$  при зміні зміщення покладена на окремий, відомий у цифровій інтерферометрії електронний пристрій – лічильник up-down. Такий простий електронний пристрій здатний працювати на частотах у сотні мегагерц, що повністю вирішує проблему однозначного вимірювання швидких зміщень (Рис.17). При цьому розподільна здатність цифрового інтерферометра визначається виразом  $\delta = \frac{\lambda}{2^{B+1}}$ , де  $B$  – розрядність АЦП. Для розробленої схеми при  $B=9$  і  $\lambda=637$  нм  $\delta=0,622$  нм. [23]

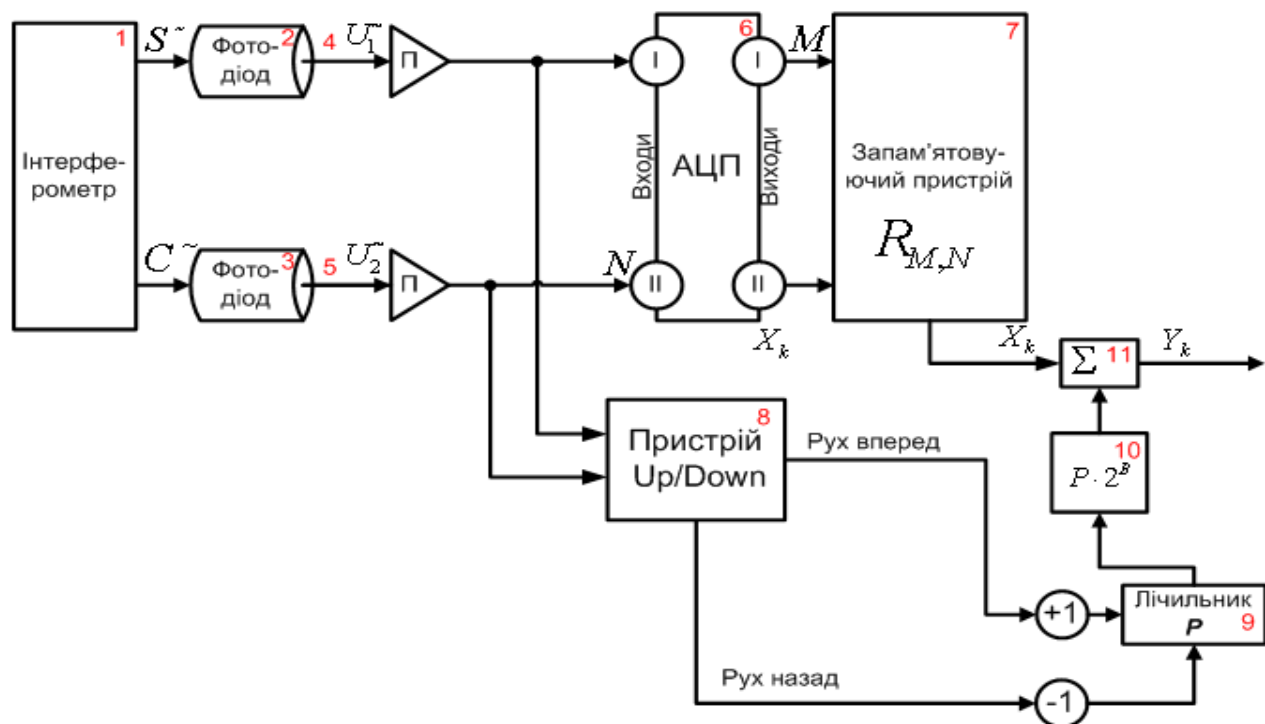


Рис.17– Структурна схема удосконаленого цифрового інтерферометра із лічильником up-down

Власне інтерферометр Майкельсона виконано на основі напівпровідникового лазера HL- 6312 G із довжиною хвилі 637 нм при температурі 25°C. Такий підхід дозволив отримати мініатюрність і мобільність вимірювальної системи. Практично підтверджена можливість її побудови в об'ємі 0,5 дм<sup>3</sup>.

Необхідно зауважити, що принцип отримання цифрових відліків в інтерферометрі є загальним для лазерів різних типів, але використання напівпровідникових лазерів має свої особливості. В першу чергу це стосується необхідності високоякісної стабілізації їх температури і потужності для досягнення стабільності довжини хвилі (Рис.18) [16].

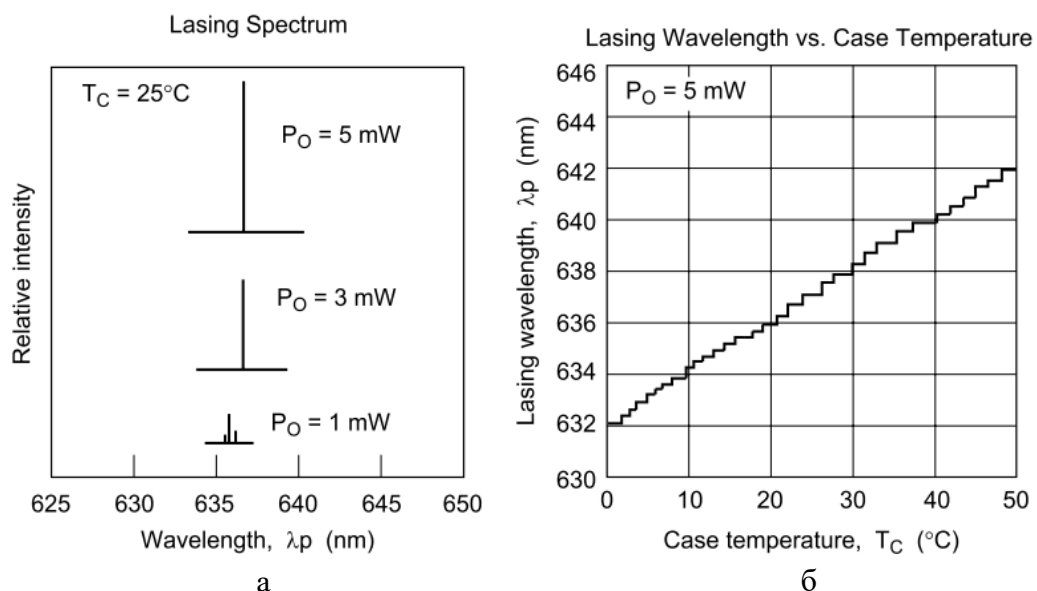


Рис.18 – Вплив потужності випромінювання (а) і температури (б) на параметри напівпровідникового лазера на прикладі лазерного діода HL 6312G

Із рисунка випливає необхідність стабілізації потужності конкретного лазера на рівні (3 – 5) мВт і різні варіанти його використання. Так для проведення лабораторних або промислових вимірювань температуру корпусу доцільно стабілізувати на рівні 16, 20 або 25  $^\circ\text{C}$ , а для підземних сейсмічних вимірювань – на рівні 9  $^\circ\text{C}$ .

Результати експериментальних досліджень свідчать про те, що температуру напівпровідникового лазера достатньо стабілізувати із точністю не гірше 0,01  $^\circ\text{C}$ . Разом із тим, для досягнення точності вимірів на рівні одиниць нанометрів більш високі вимоги висуваються до теплового розширення самого корпусу інтерферометра і вимірювальної системи в цілому, враховуючи їх теплову інерційність відносно середовища вимірювань. Це наглядно підтверджується експериментальними результатами (Рис.19, 20).



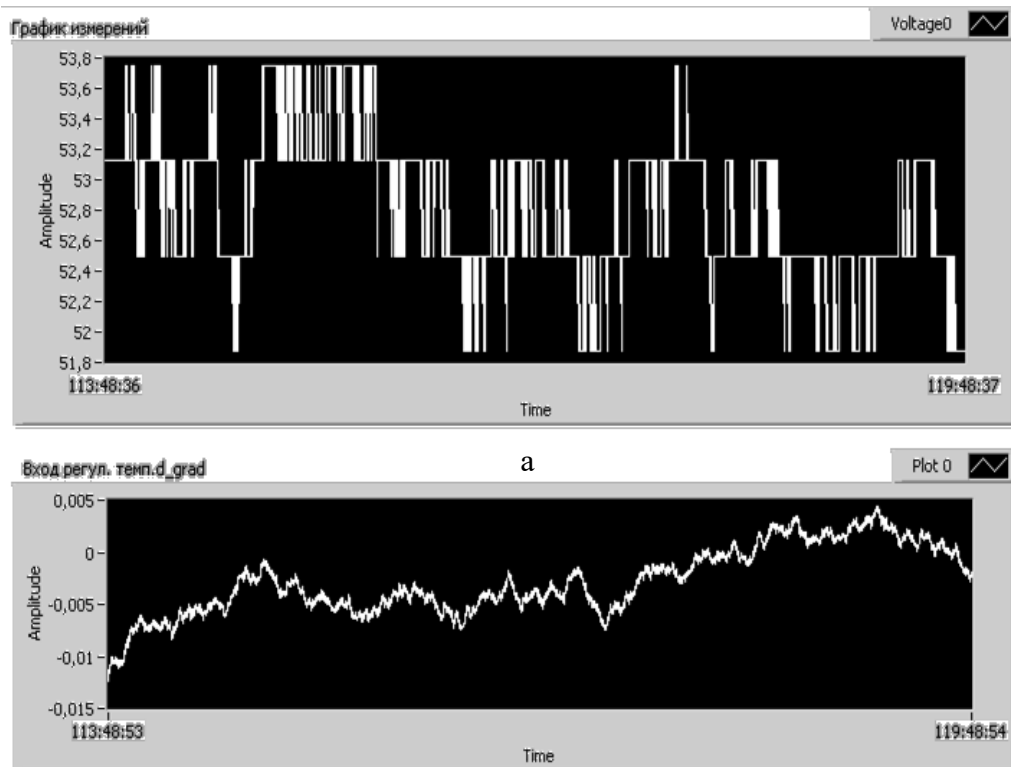


Рис.19 – Результати вимірювань <sup>б</sup> у стабільному середовищі: відносна відстань, нм (а); похибка стабілізації температури корпусу лазера, град. (б)

На Рис.19 наведені результати вимірювання запропонованим інтерферометром при жорстко закріплених відбивачах і практично стабільному середовищі вимірювань. Як слідує із Рис.19(а) за 6 хвилин абсолютна похибка вимірювань не перевищила 1 нм. При цьому навмисно був вибраний перехідний режим системи стабілізації корпусу лазера, при якому похибка стабілізації температури змінювалася у межах  $(-0,012...0,004) ^\circ\text{C}$  (Рис.19(б)). На Рис.20 наведені результати аналогічних вимірювань у відносно збудженому середовищі при коливанні температури з амплітудою у межах  $0,05 ^\circ\text{C}$ .

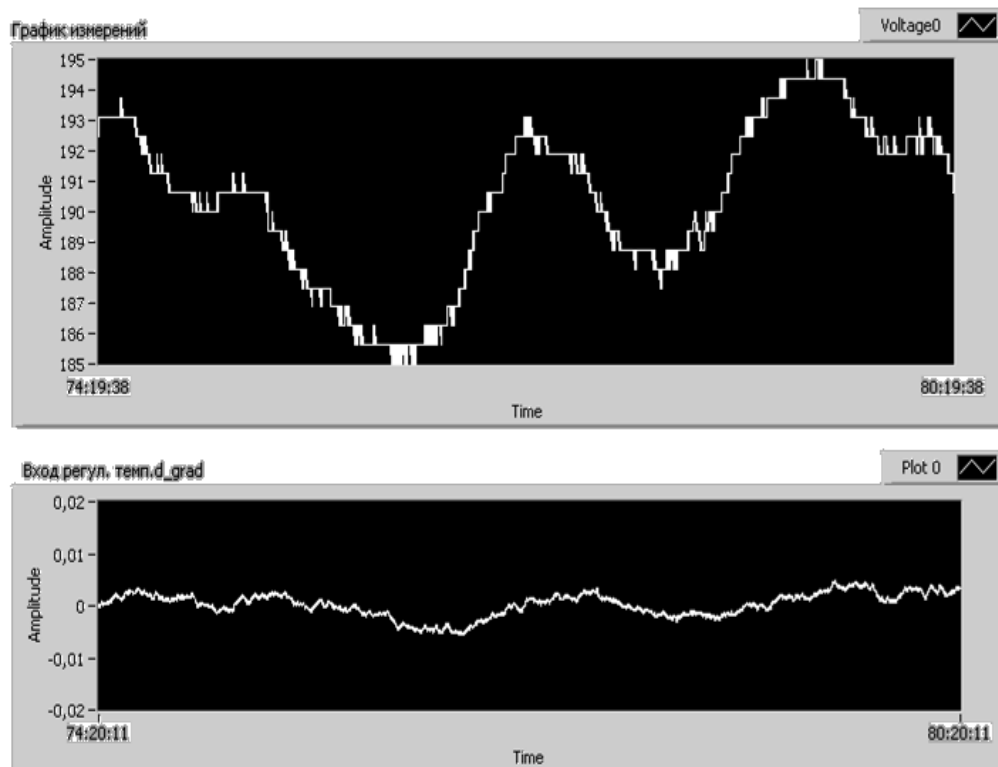


Рис.20 – Результати вимірювань у нестабільному середовищі: відносна відстань, нм (а); похибка стабілізації температури корпусу лазера, град. (б)

Про наявність коливань температури свідчить похибка стабілізації температури корпусу лазера (Рис.20(б)). При цьому похибка вимірювання відносної відстані змінювалася практично синфазно (Рис.20(а)) і досягала 5 нм. Елементарні розрахунки доводять, що основною причиною похибки вимірювань є теплове розширення корпусу інтерферометра. Це свідчить про необхідність у подальшому прецизійної стабілізації температури вимірювальної системи і розробки контролера урахування параметрів середовища вимірювань.[16,23]

### 2.2.3.2 Дослідження пристроїв стабілізації температури і потужності напівпровідникового лазера

Пристрій регулятора температури було розроблено на основі інтегрованого контролера температури для модулів Пельтьє MAX1978. Він представляє собою мініатюрний, прецизійний, повний за схемотехнікою однокристальний контролер, який не потребує зовнішніх підсилювачів. Всередині контролера розміщено потужні польові транзистори,

					МД.ПМ71.25.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

які розраховані на вихідний струм до 6А. Навантаженням для контролера слугують термоелектричні модулі (ТЕС), які ще називають модулями Пельтьє.

Схема терморегулювання побудована так, щоб мінімізувати кількість зовнішніх компонентів при збереженні високої ефективності роботи. Частота комутації внутрішніх МОП транзисторів оптимізована для зниження шуму й електромагнітних перешкод і дорівнює 500кГц/1мГц . Підсилювач-модулятор має наднизький дрейф і забезпечує стабільність температури з точністю  $\pm 0,001$  ° С. MAX1978 працює від одного джерела живлення 5В, і забезпечує біполярний струм  $\pm 3$ А в навантаженні ТЕС, що включений між виходами двох синхронно працюючих імпульсних регуляторів. Біполярний вихід дозволяє контролювати температуру без «мертвих зон» або інших нелінійностей при низьких струмах навантаження.

Контролер MAX1978 містить усі необхідні підсилювачі, які потрібні для створення замкнутої системи автоматичного регулювання температури. Стабілізований підсилювач-модулятор і прецизійний підсилювач інтегратора разом із зовнішніми RC ланцюгами представляють пропорційний інтегрально-диференціальний (ПІД) регулятор, від правильного настроювання й розрахунку якого залежить стабільна робота регулятора температури. Характеристика теплової реакції модуля ТЕС враховується при розрахунку компенсації теплопередавального контуру. На Рис.21 представлено зовнішні RC ланцюги, які розраховуються в залежності від теплових параметрів модуля ТЕС і пасивного радіатора охолоджувача.

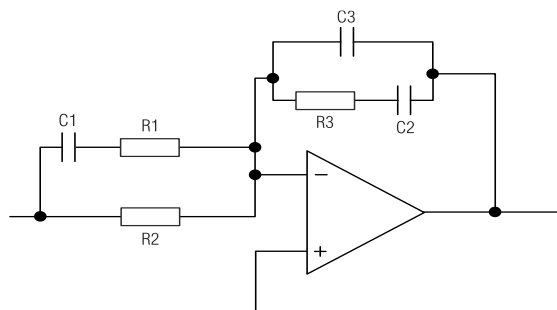


Рис.21 – Пропорційний інтегрально-диференціальний (ПІД) регулятор

					МД.ПМ71.25.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

На Рис.22 зображена принципова електрична схема розробленого пристрою регулятора температури для напівпровідникових лазерів

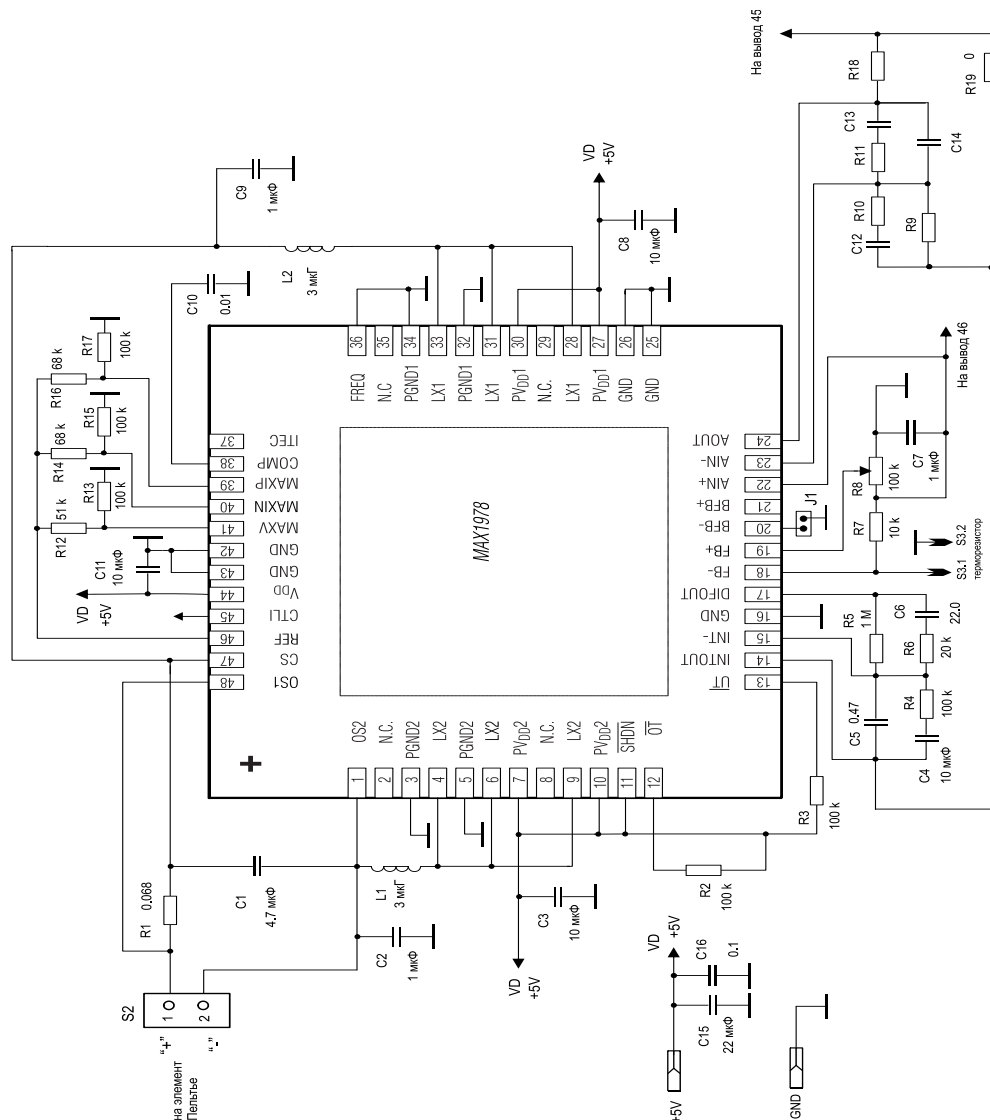


Рис.22 – Принципова електрична схема регулятора температури

Необхідний для регулювання сигнал помилки формується з різниці між заданим значенням напруги, яка відповідає обраній температурі стабілізації, і напруги на терморезисторі, що встановлений поруч із корпусом лазера.

Розроблений пристрій регулятора температури на основі інтегрованого контролера температури для модулів Пельтьє MAX1978 в складі інтерферометричної системи показав точність підтримки температури  $\leq 0.003$  C°. [17]

### 2.2.3.3 Пристрій стабілізації потужності напівпровідникового лазера

Пристрій був розроблений на основі контролера фірми Analog Devices ADN2830ACP32. Функціональна блок-схема контролера представлена на Рисунку 23.

Контролер забезпечує замкнутий цикл управління оптичною потужністю випромінювання напівпровідникового лазера. У використуваному в інтерферометрі напівпровідниковому лазері HL6312G мається спільно з випромінюючим (лазерним) діодом (LD), фотодіод-монітор (MPD) або, так званий вимірювальний фотодіод, необхідний для контролю оптичної потужності, що випромінюється лазером.

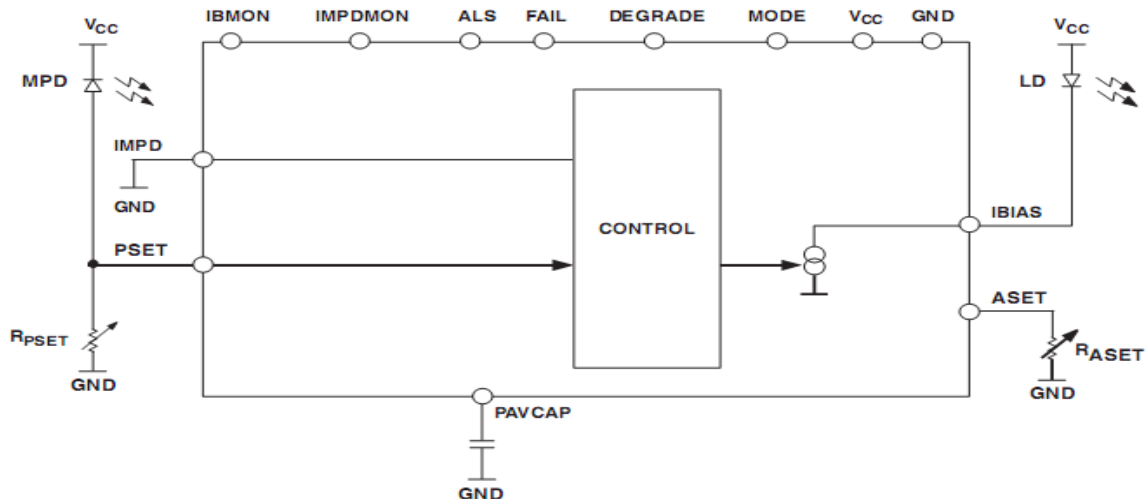


Рис.23 - Функціональна блок- схема контролера ADN2830

Вимірювання потужності випромінювання лазера здійснюється фотоприймачем MPD, а встановлення необхідної потужності випромінювання - за допомогою резистора в лінії PSET драйвера ADN2830. Розроблена схема електрична принципова стабілізації потужності випромінювання лазера представлена на Рис.24.

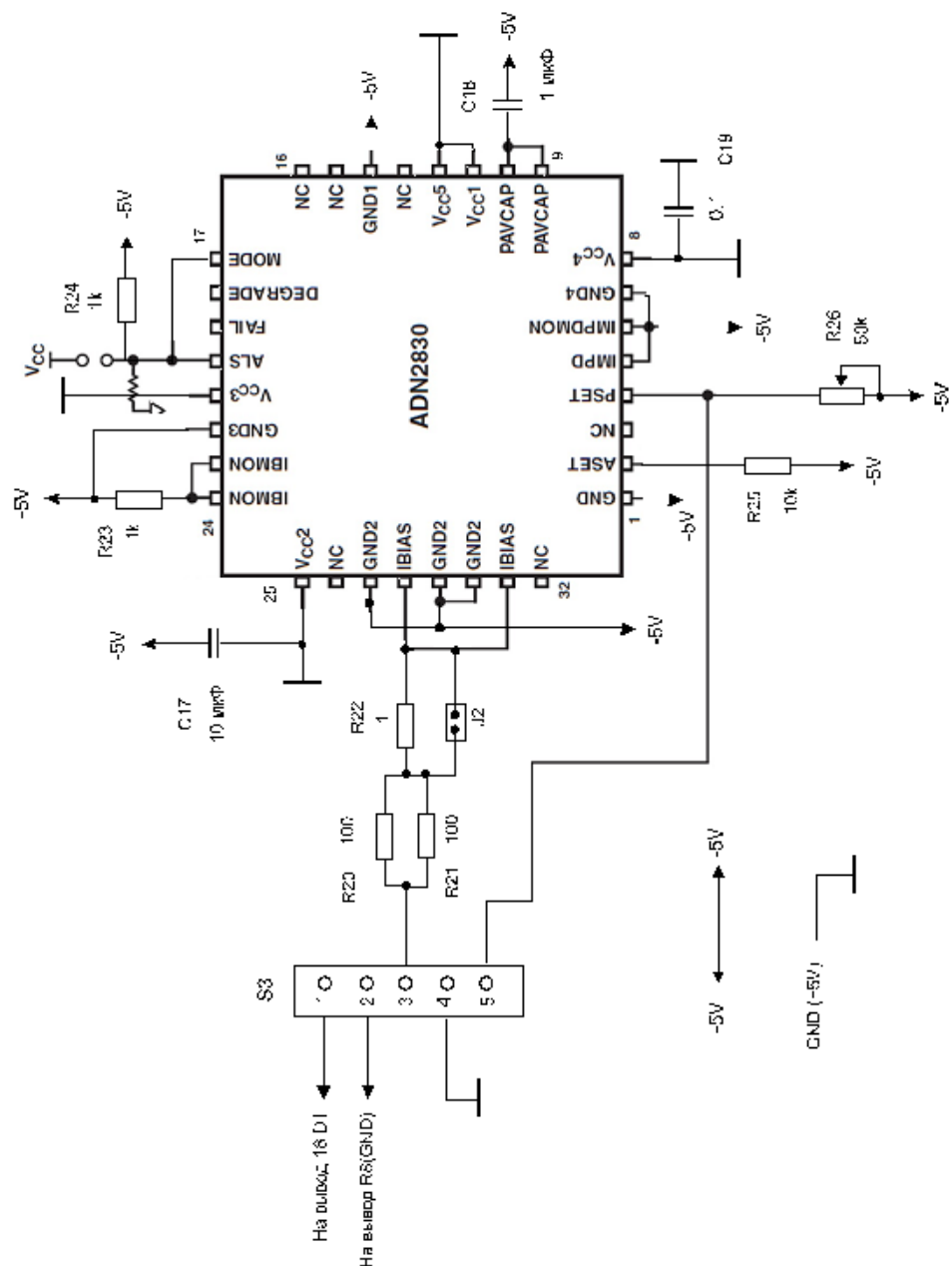


Рис.24 - Пристрій стабілізації потужності напівпровідникових лазерів.  
Схема електрична принципова

Експериментальні дослідження показали, що контролер ADN2830 може забезпечити стабілізований за потужністю випромінювання струм напівпровідникового лазера до 60 мА, що відповідає умовам застосування лазерного діода HL6312G. [18]

Розроблена система стабілізації променя напівпровідникових лазерів буде реалізована на друкованій платі. На платі також були розміщені інтегральні

					МД.ПМ71.25.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

перетворювачі напруги на -5В, +15В, -15В. Це дало можливість спростити блок живлення і підвищити надійність пристрою.

#### 2.2.3.4. Оптична схема інтерферометра Майкельсона із квадратурними вимірювальними каналами

Лазерна інтерферометрія – це метод безконтактного, високоточного (прецизійного) вимірювання переміщення рухомої платформи. Метод базується на фізичному явищі інтерференції світла. Для точного вимірювання амплітуди коливань платформи вібростенду обрано лазерний датчик. Платформа вібростенду має можливість коливатись у вертикальній та горизонтальній площинах. Інтерферометричний датчик для вимірювання амплітуди вертикальних коливань було розглянуто в попередньому звіті. Розглянемо інтерферометр для вимірювання горизонтальних коливань платформи вібростенду.

Оптична схема лазерного інтерферометра для вимірювання амплітуди коливань платформи вібростенду в горизонтальній площині показано на Рис.25

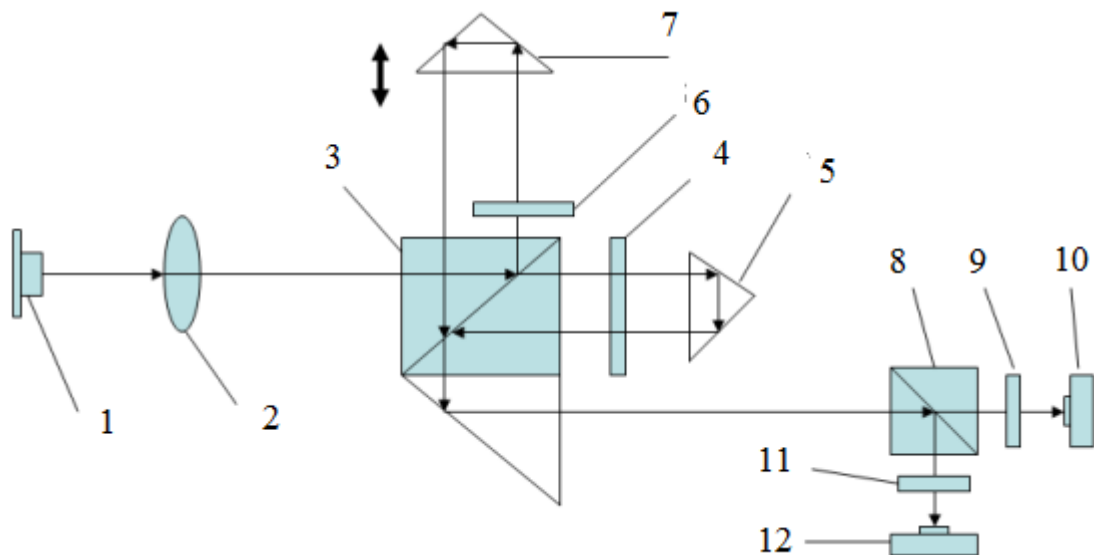


Рис.25 Оптична схема горизонтального інтерферометра

Склад оптичної схеми горизонтального інтерферометра.

1. Лазерний діод.
2. Мікрооб'єктив.
3. Світлоподільний кубик.
4. Фазова пластина  $\lambda / 2$ .
5. Нерухомий ретрорефлектор (кутовий відбивач).
6. Фазова пластина  $\lambda / 4$ .
7. Рухомий ретрорефлектор (кутовий відбивач).
8. Поляризаційний кубик.
9. Поляризатор.
- 10, 12. Фотодетектор
11. Поляризатор.

#### **2.2.3.4 Принцип дії горизонтального інтерферометра вібростенду**

Промені від лазерного діода 1 колімуються об'єктивом 2, розділяються на два променя кубиком 3. Перший іде на фазову пластину 4 та нерухомий ретрорефлектор 5, другий на фазову пластину 6 та рухомий ретрорефлектор 7. Відбиті промені об'єднуються і потрапляють на поляризаційний кубик 8, поляризатор 9, фотодетектор 10, поляризатор 11 та фотодетектор 12.

#### **2.2.3.5 Цифровий сигнальний процесор для обробки сигналів квадратурних каналів інтерферометра**

Цифровий сигнальний процесор мінікомп'ютером, який перетворює вхідні сигнали інтерферометра в потік Ethernet-кадрів, які містять інформацію про актуальну позицію рухомої частини (плити віброплатформи).

					МД.ПМ71.25.000ПЗ	Арк.
						41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Конструктивно процесор складається з двох плат:

- плати цифрової обробки сигналів, яка містить в собі центральний процесор ARM CORTEX-A8, схему формування сигналів Ethernet з рознімачем RJ-45, пам'ять табличних функцій обсягом 4М на мікросхемі стандарту E-MMC.
- плати аналогової обробки сигналів, яка перетворює двополярні синусно-косинусні сигнали в нормалізований сигнал напруги.

З алгоритмічної точки зору сигнальний процесор має на вході комплексну пару координат, яка відповідає положенню рухомої частини в кожний момент часу. Використовуючи табличну функцію, сигнальний процесор перераховує комплексну координату в кут, який співвідноситься з положенням рухомої частини в періоді інтерферометра. Маючи, таким чином, позицію рухомої частини в середині періоду, сигнальний процесор використовує спеціальний алгоритм на границях періоду, роблячи висновок про перехід в наступний чи попередній період. Вихідна інформація сигнального процесора (позиція) розраховується на основі номеру періоду та позиції в середині періоду.

Сформовані IP-пакети передаються по Ethernet 1000 разів на секунду.

Живлення обох плат організовано через стандартний рознімач USB, що дозволяє легко підключати сигнальний процесор до мережевого перетворювача або до порту персонального комп'ютера.

При живленні від персонального комп'ютера додатково створюється відлагоджувальний COM-порт, який дозволяє спілкуватися з процесором протоколом SSH. Для реалізації даного порту використовується драйвер FTDI, який є за замовчуванням в більшості сучасних операційних систем.

Для підключення інтерферометра використовується трьох-дротове підключення, нульовий провід є спільним для обох сигналів.

Кожний вхід має два калібрувальних резистора: підсилення (gain) та положення нуля. Резистори мають маркування G1,G2,Z1,Z2 відповідно.

Після підключення сигнальний Процесор автоматично починає виконувати функцію TCP-сервера та не потребує додаткових операцій. Можлива

					МД.ПМ71.25.000ПЗ	Арк.
						42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

організація багатьох з'єднань одночасно, як з дротового Ethernet RJ-45, так і з Ethernet-USB.

Сигнальний процесор очікує входних контактів по порту 5050.

В разі знаходження підключення, в сокет починаються посилання стандартних кадрів в форматі LabView. Кожний кадр починається з чотирьох байт – довжина пакета, далі zero-terminated рядок з двома числами через кому. Перше число – відносний час посилки пакету в мілісекундах, друге число – результат обчислювання, тобто позиція рухомої частини.

Програмне забезпечення цифрового сигнального процесора складається з наступних модулів, наведених в додатках:

- утиліта перетворення таблиці арктангенсів з текстового вигляду в програму на мові C++ ;
- юнікс-демон, який відповідає на TCP-порт 5050 – main.c;

#### **2.2.3.6 Розробка драйвера п'єзоактуатора віброплатформи**

Драйвер п'єзоактуатора призначений для управління пьезоактуатором, який, у свою чергу, визначає величину переміщення віброплатформи залежно від величини керуючої напруги. Він працює на ємнісне навантаження 2,2 мкФ одного або декількох п'єзоактуаторів (до трьох). Схема електрична принципова драйвера п'єзоактуатора віброплатформи зображена на Рис.26.

Вхідний ланцюг драйвера складається з операційного підсилювача 544УД2А з малими входними струмами , на інвертуючий вхід якого подається керуюча напруга  $U_{упр} = \pm 1$  В. Підсилювач охоплено негативним зворотним зв'язком за допомогою резисторів R3 , R4 , R5.

					МД.ПМ71.25.000ПЗ	Арк.
						43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

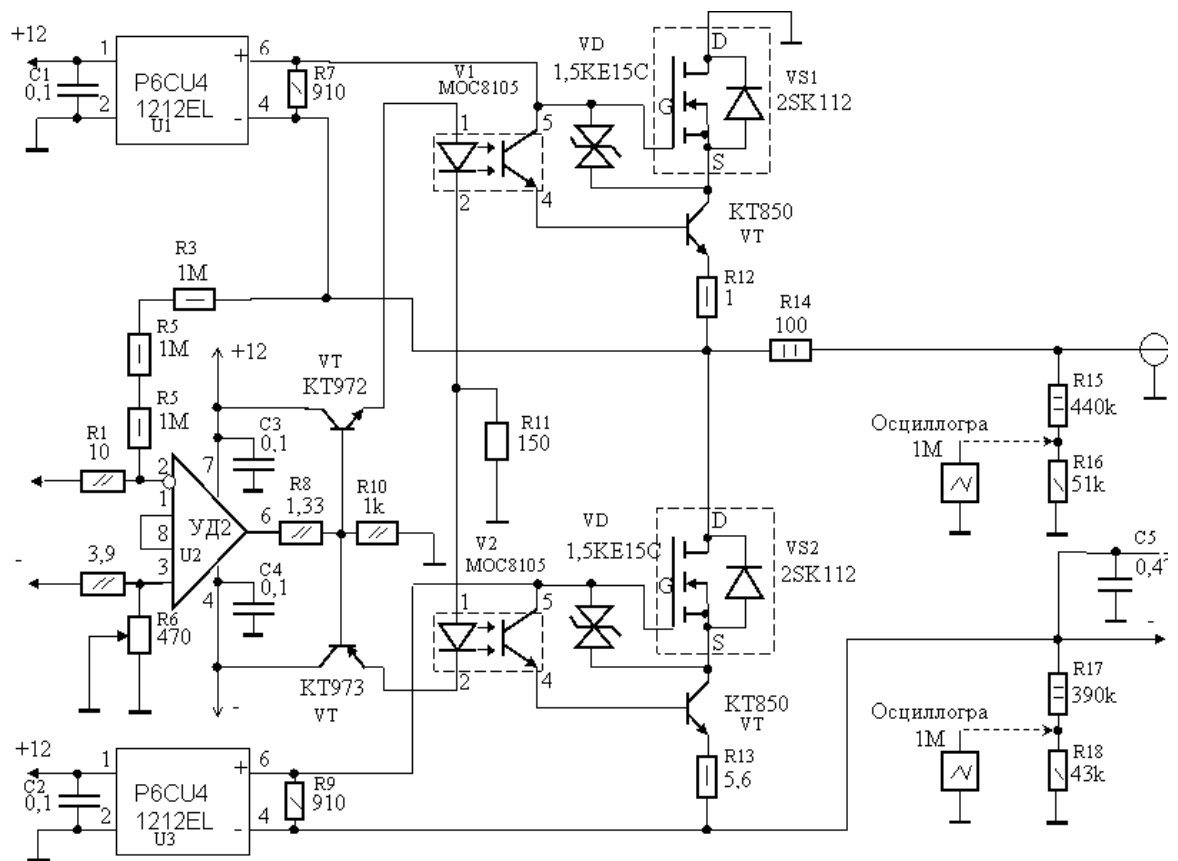


Рис.26 - Схема електрична принципова драйвера п'єзоактюатора віброплатформи

Для розв'язки високовольтної та низьковольтної частин схеми використані оптоелектронні елементи MOC8105 і DC -DC перетворювачі P6CU4 1212ELF .

Робота оптоелектронних елементів MOC8105 забезпечується парою комплементарних транзисторів KT972A і KT973A з великим статичним коефіцієнтом підсилення. Оптотранзистори MOC8105, що працюють з KT850A, забезпечують вихідний струм схеми. Сапресори 1,5 KE15CA необхідні для запобігання пробую G-S польового транзистора 2SK1120, чутливого до перевищення напруги. Резистором R6 встановлюється робоча точка напруги на рівні -300 В.

Подільники напруги R15 - R16 і R17 - R18 необхідні для контролю вихідної напруги драйвера і напруги живлення за допомогою звичайного осцилографа з вхідним опором 1 Мом . Живлення драйвера здійснюється нестабілізованою напругою - 700В .

Конструкція драйвера забезпечує тривалу роботу при нормальних умовах в діапазоні  $\pm 300$  В і діапазоні робочих частот до 50 Гц і більше. Це відповідає переміщенню платформи не менше  $\pm 50$  мкм[23].

### 2.2.3.7 Юстировка оптичної схеми горизонтального інтерферометра вібростенду

Юстировка оптичної схеми інтерферометра( потрібна для того щоб отримати стабільні електричні сигнали на виході фотодетекторів. Спочатку мікрооб'єктив 2 виставляється так, щоб отримати на виході паралельні промені. Лазерний блок виставляється трьома прижимними та трьома віджимними болтами. Блок  $\sin - \cos$  виставляється для променя, відбитого від нерухомого ретрорефлектора 5. Далі виставляється рухомий ретрорефлектор 7 так, щоб відбитий від нього промінь співпав з променем відбитим від нерухомого ретрорефлектора 5.

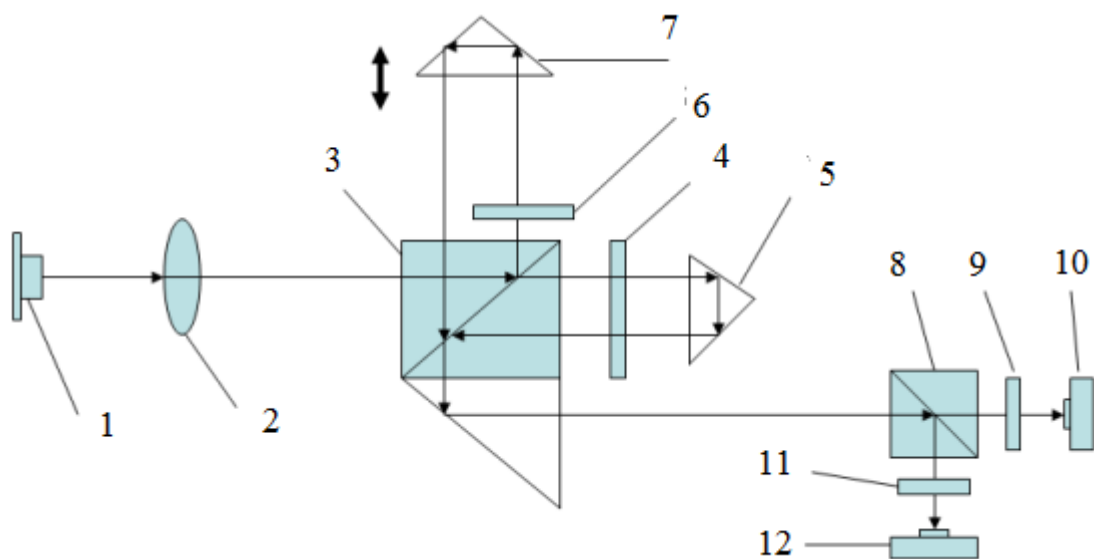


Рис.27– Оптична схема горизонтального інтерферометра

Нарешті треба забезпечити зсув фази  $90^0$  між квадратурними сигналами  $\sin - \cos$ . Це досягається шляхом поворота фазових пластин 4,6 та поляризаторів 9,11.

### 2.2.3.8 Особливості роботи горизонтального та вертикального інтерферометрів вібростенду

Для забезпечення стабільної роботи інтерферометричних датчиків в складі вібростенду треба врахувати, що рухомі кутові відбивачі, які закріплені на робочій платформі, повинні рухатись вздовж (паралельно) падаючого лазерного променя. Якщо є перпендикулярна складова цього руху тоді маємо деякий паразитний сигнал помилки, який замішено з робочим сигналом. Цю тезу показано на Рис.28.

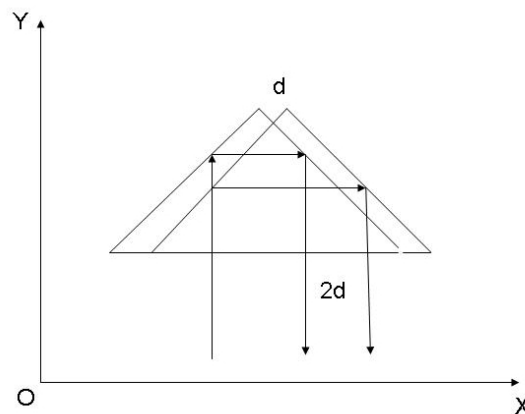


Рис.28 – До особливостей роботи одного із каналів інтерферометра

Якщо рухомий кутовий відбивач переміщається перпендикулярно падаючого лазерного променя вздовж вісі OX на відстань  $d$ , то відбитий лазерний промінь переміщається на відстань  $2d$ . В результаті маємо в робочому сигналі паразитну амплітудну модуляцію.

Використаний в інтерферометрах вібростенда напівпровідниковий лазер HL6312 Opnext Hitachi (Японія) має температурний дрейф частоти випромінювання  $0,2 \text{ нм/}^\circ\text{C}$ . При підтримці сталої температури корпусу напівпровідникового лазера, завдяки розробленому пристрою регулятора температури на основі інтегрованого контролера температури для модулів Пельтьє MAX1978, досягнуто нестабільності довжини хвилі випромінювання, близької до гелій-неонових лазерів. Точність підтримки температури напівпровідникового лазера  $\leq 0.003 \text{ }^\circ\text{C}$  [19].

					МД.ПМ71.25.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

#### 2.2.4 Розробка конструкції вібростенду.

Спираючись на кінематичну схему вібростенду, було розроблено модель. Модель (Рис.29) розроблена у середовищі SolidWorks, складається з:

- платформи;
- драйвера п'єзоактюатора;
- двох п'єзоактюаторів;
- апаратно-програмного блока керування;
- двох цифрових лазерних інтерферометрів;
- масляного гідропідійомника.

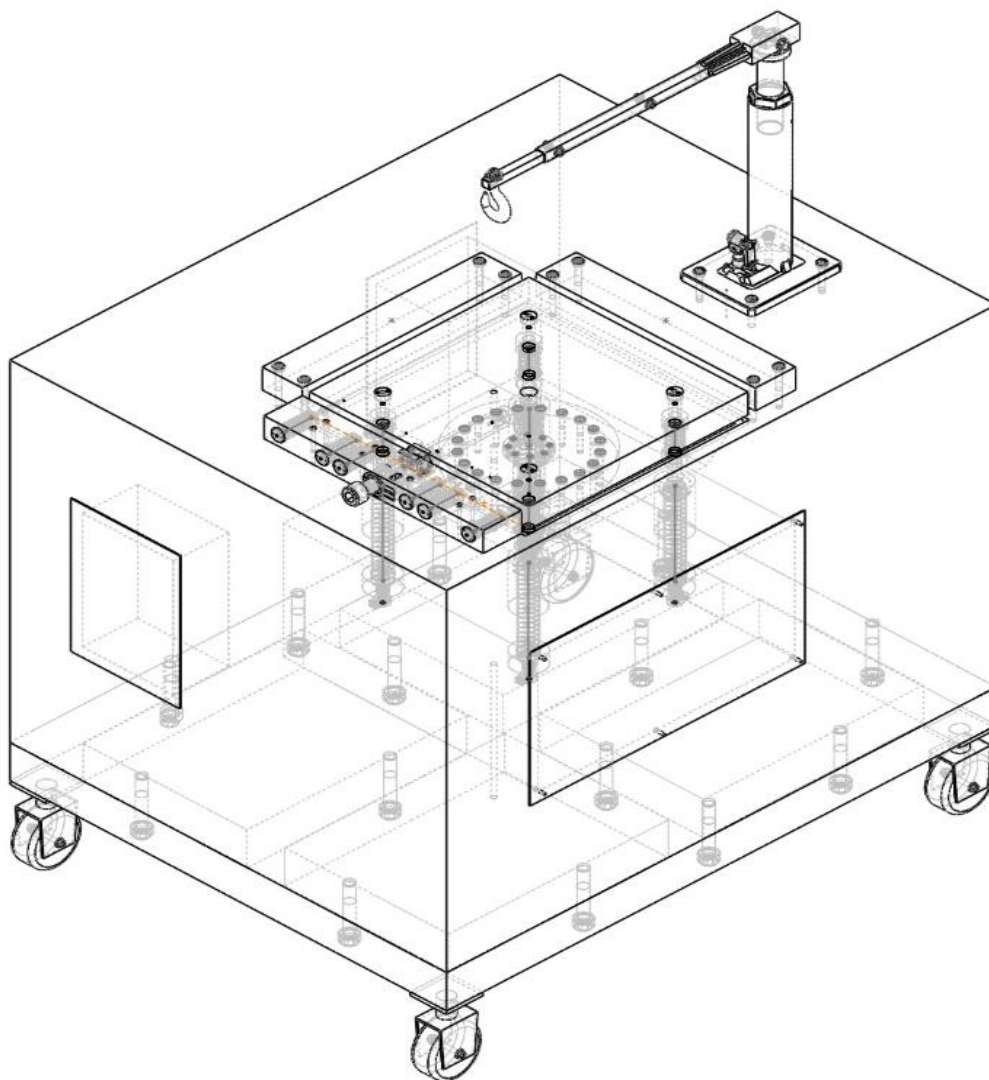


Рис.29 Модель віброплатформи

					МД.ПМ71.25.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

#### 2.2.4.1 Основа віброплатформи

Весь пристрій базується на масивній основі масою 3,4 тони відливої із чавуна. Така маса основи потрібна для того щоб знизити зовнішні вібраційні впливи. Спроектована основа зображена на рисунку 30.

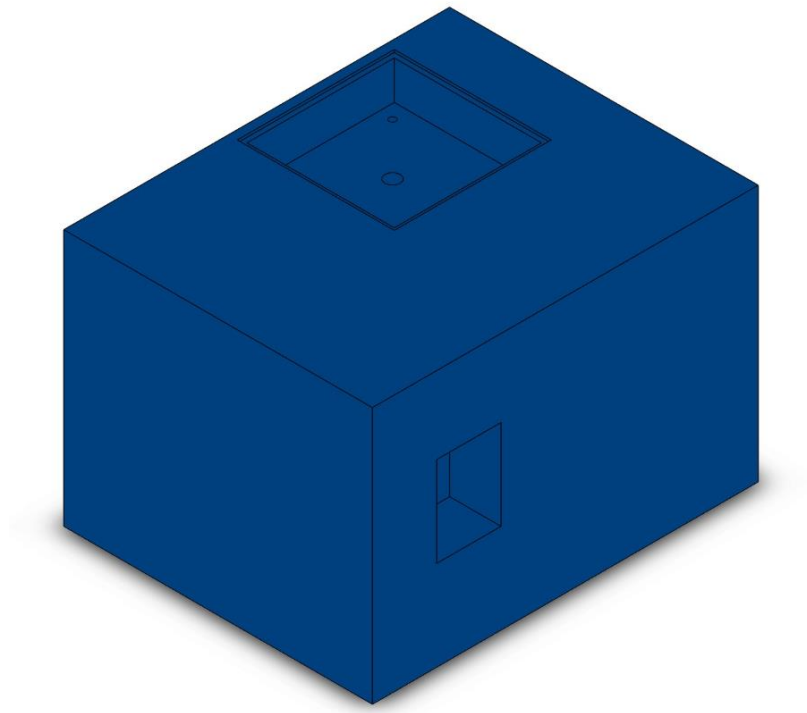


Рис.30 Основа віброплатформи

#### 2.2.4.2 Платформа

Платформа відлита із дюралюмінію масою 60 кілограм. По всій площині плити зроблені різьбові отвори для закріплення приладів які проходять випробування. У платформу зображену на рисунку 31 вкручуються гнучкі шпильки, які надалі вставляються у брус (рис.32), який закріплений на основі.

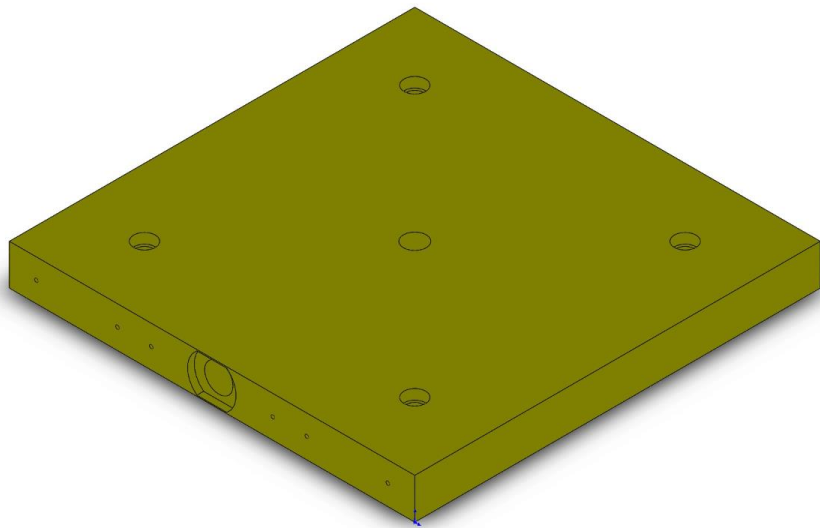


Рис.31 Плита

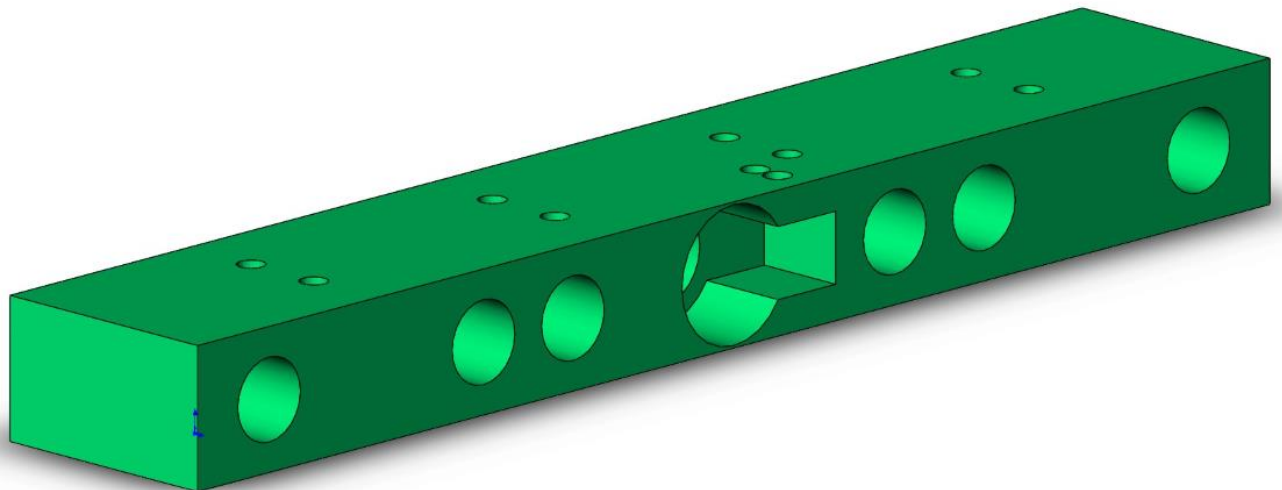


Рис.32 Брус

Далі у брус вставляються пружини які прижимаються гайкою, та вставляється розрізна гільза(рис.33), на яку одягається хомут (рис.34) який надалі буде фіксувати прижимний гвинт пьезоактюатора від відкручування.

					МД.ПМ71.25.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49



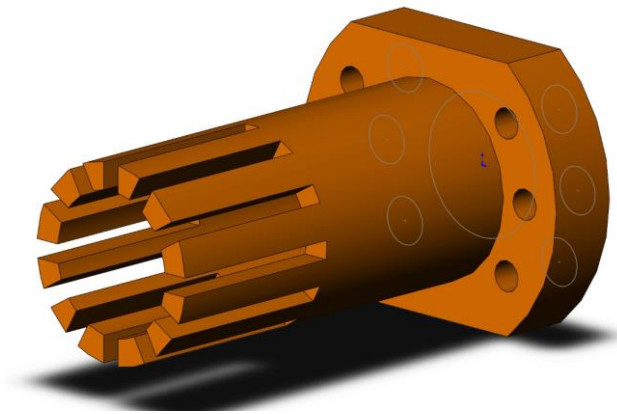


Рис.33 Гільза

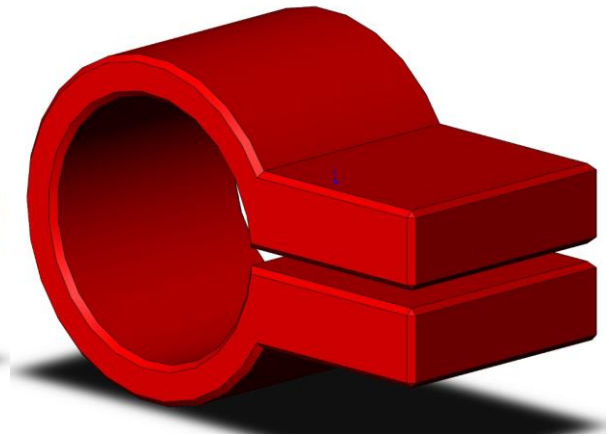


Рис.34 Прижимний хомут.

#### 2.2.4.3 П'єзоактюатор

Для даної віброплатформи ми вибрали п'єзоактюатор PI P239 (Рис.35). Він виконує горизонтальне і вертикальне переміщення платформи.



Рис.35 П'єзоактюатор

					МД.ПМ71.25.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

## 2.3. Обробка отриманих результатів досліджень.

### 2.3.1 Розрахунок власної частоти коливань станини віброплатформи на пневмоопорі.

З метою зменшення зовнішніх вібраційних впливів на віброплатформу були проведені випробування з використанням м'ячів зі стиснутим повітрям, як віброізоляції пневмоопори.

Для оцінки величини власної частоти коливань станини на спроектованій пневмоопорі були проведені вимірювання і розрахунок жорсткості одного м'яча а, також, всієї пневмоопори з повного комплекту м'ячів.

При вазі пристрою  $P$  :

$P = mg$ , (5) де:  $m$  – маса станини;

$m = 3400 \text{ кг};$

$g$  – прискорення вільного падіння;

$g = 9.81 \text{ м/с}^2;$

$P = 33300 \text{ н};$

і кількості м'ячів:

$n = 22 \text{ шт};$

сила, що діє на один м'яч дорівнює:

$P' = P/n = 1515 \text{ н};$

Тиск в м'ячі становив:

$p \sim 0.05 \text{ Мпа};$

Оскільки жорсткість сферичного тіла при стисненні між плоскими поверхнями – величина змінна, а шукану жорсткість потрібно визначити при зусиллі, близько до  $P'$ , то спочатку м'яч навантажувався вагою близько  $1000 \text{ н}$  а потім додавався залишок вагою приблизно  $500 \text{ н}$ , і вже при цьому здійснювався замір величини стиснення м'яча  $\Delta l$ . Результат такого заміру:

при  $F = 500 \text{ н}$  - деформація м'яча дорівнює:  $\Delta l \sim 5 \cdot 10^{-3} \text{ м};$

					МД.ПМ71.25.000ПЗ	Арк.
						51
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Звідси жорсткість одного м'яча дорівнює:

$$c' = F/\Delta l = 100000 \text{ н/м};$$

Жорсткість пневмоопори з 22-х м'ячів дорівнює:

$$c = c' * 22 = 2200000 \text{ н/м};$$

Звідси частота вільних коливань пристрою на пневмоопорі з 22-х м'ячів дорівнює:

$$f = 1/2\pi\sqrt{c/m} = 4.05 \text{ Гц};$$

Потім була виготовлена і встановлена пневмоопора і проведені випробування.

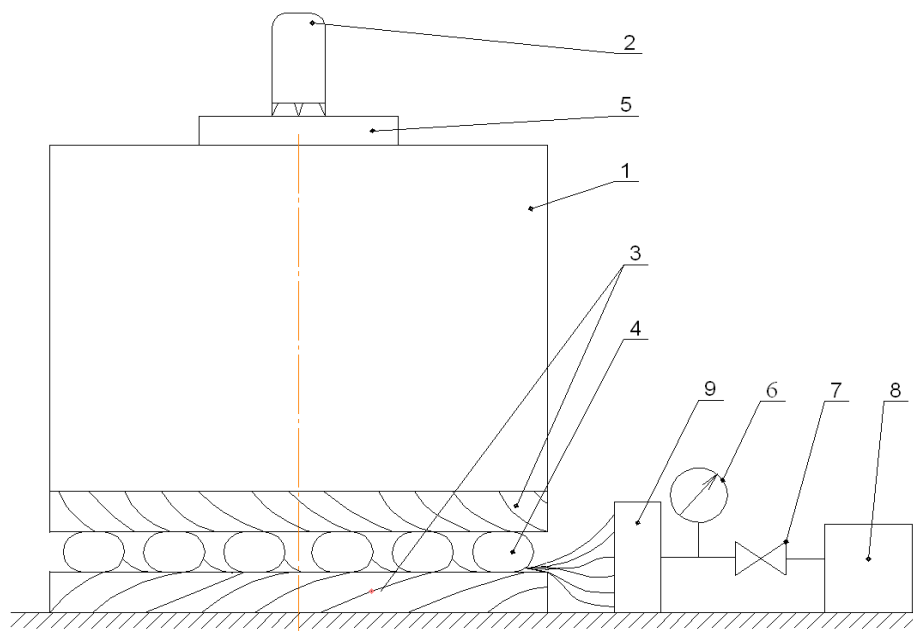


Рис. 36 – Схема віброплатформи з пневмоопорою

Схема з пневмоопорою має такий вигляд. Між двома дерев'яними піддонами 3 (рис. 36), з яких верхній з'єднаний зі станиною 1, рівномірно розподілені 22 м'ячі 4. Кожен з м'ячів безпосередньо з'єднаний через розподільник 9 з компресором 8. Тому в кожному м'ячі підтримується однаковий тиск, який контролюється манометром 6. Після того, як пневмоопора виходить на робочий режим і відбувається спливання станини, компресор відключається і система перекривається вентилем 7. Далі проводяться вимірювання частотної характеристики системи станина – пневмоопора за допомогою сейсмометра 2, встановленого на столі 5.

					МД.ПМ71.25.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

На частотах вище 10 Гц амплітуди коливань стали практично дорівнювати нулю. Однак, в діапазоні частот від 1 до 10 Гц спостерігались резонанси. Особливо велика амплітуда резонансу на частоті 5 Гц. Це як раз частота вільних коливань станини. Також присутні менші за величиною резонанси на частотах 2 – 3 Гц, що є частотою кутових коливань станини. Ці низькочастотні коливання за величиною виявилися більшими ніж для випадку, коли станина стоїть без пневмоопори.

Як видно, пневмоопора на м'ячах добре працює на частотах вище 10 Гц, але на частотах від 2-х до 5 Гц вона має значні резонанси. Це не дозволяє використовувати пневмоопору в тому вигляді, який є. Тому потрібен подальший пошук і випробування варіантів віброопор.

### 2.3.2 Структурна схема процесу визначення частотних характеристик сейсмометричних приладів

Загальновідомо, що для експериментального визначення частотних характеристик лінійного інерційного об'єкта необхідно знайти залежності  $L(\omega_i) = 20 \lg(N(\omega_i))$  - логарифмічну АЧХ та  $\varphi(\omega_i)$  - ФЧХ. АЧХ  $N(\omega_i) = \frac{\tilde{O}_{\hat{a}\hat{e}\hat{o}}(\omega_i)}{\tilde{O}_{\hat{a}\hat{o}}(\omega_i)}$ ,  $\varphi(\omega) = \varphi_{\hat{a}\hat{e}\hat{o}}(\omega_i) - \varphi_{\hat{a}\hat{o}}(\omega_i)$ , (6) де  $X$  і  $\varphi$  – амплітуди і початкові фази вихідних і вхідних гармонічних коливань досліджуваного об'єкта на  $i$  – й частоті. У нашому випадку вхідними є коливання віброплатформи, а вихідними – сигнали досліджуваного сейсмометра. На наступному рисунку 37 такі залежності видно при панорамній зміні частоти коливань віброплатформи на прикладі сейсмометра SL210.

					МД.ПМ71.25.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

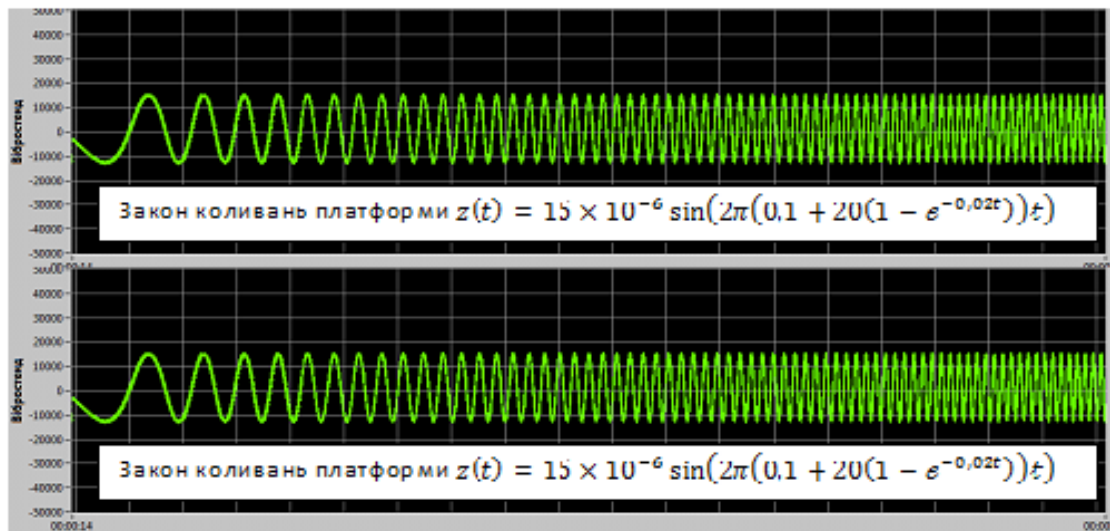


Рис. 37 Частотнозалежна реакція сейсмометра на вхідні коливання.

У ручному режимі процес експериментального визначення частотних характеристик є довготривалим і трудомістким. Наприклад, для їх визначення в логарифмічному масштабі в діапазоні частот від 0,01 Гц до 50 Гц необхідно обробити результати 32 вимірів. Тому такий процес доцільно автоматизувати. Для цього використано FFT – перетворення вхідного і вихідного сигналів із виділенням амплітуд і фазових зсувів перших гармонік відповідних сигналів.

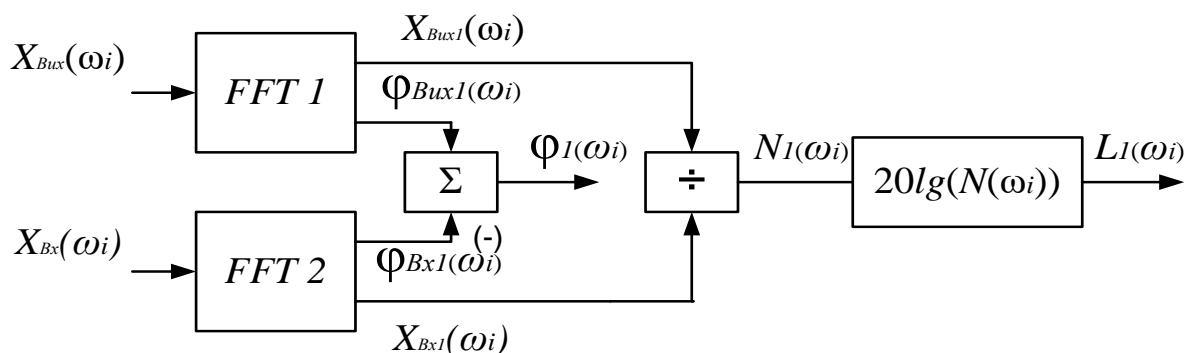


Рис.38 Структурна схема експериментального визначення ЧХ сейсмометра

Вищезазначена структурна має реалізацію в середовищі LabView і зображена на рис. 39

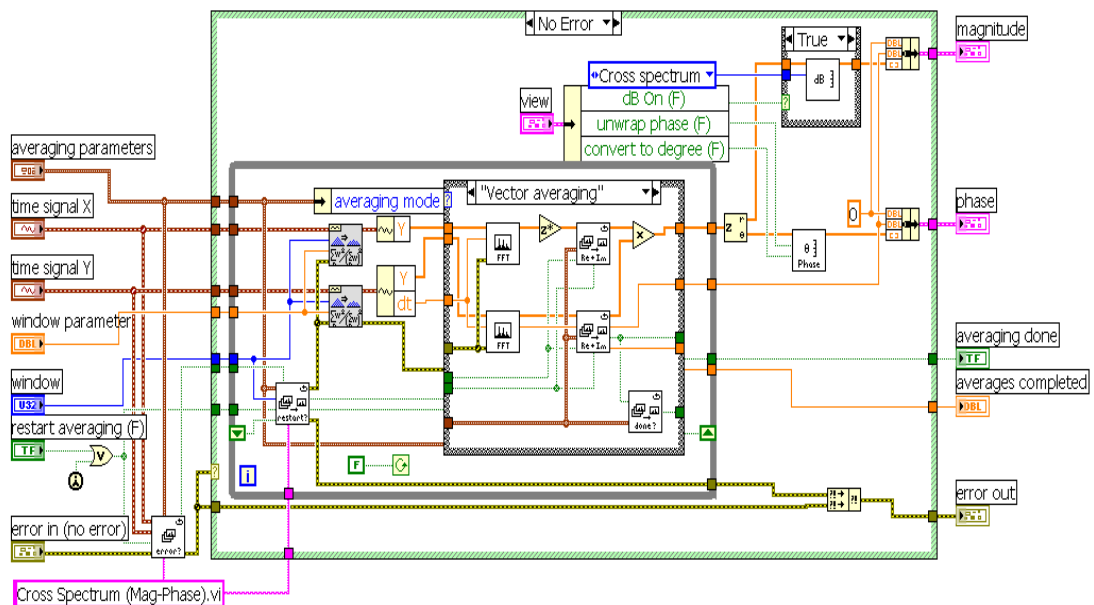


Рис.39 Розгорнута схема процедури визначення модуля і аргументу передаточної функції динамічного об'єкту (сейсмометра) на поточній частоті

Програма експериментального визначення частотних характеристик сейсмометрів у заданій смузі частот наведена у додатках[23].

### 2.3.3 Ідентифікація параметрів частотних характеристик сейсмометрів по експериментальним даним

Враховуючи сутність функціонування сейсмометра та положення основ теорії автоматичного управління , можна стверджувати, що його математична модель (передаточна функція по Лапласу) складається із пропорційної, диференційних, коливальних і аперіодичних ланок. Про це також свідчать результати аналізу математичних моделей, які наводяться провідними світовими виробниками. Наприклад, для вертикального каналу сейсмометра типу CMG-40TD із серійним номером T4093 виробництва компанії Guralp Systems (Велика Британія) у документі «TEST AND CALIBRATION DATA» наводяться наступні значення нулів і полюсів передаточної функції:

$$s_1 := (-23.26 + i \cdot 23.56) \cdot 2 \cdot \pi \cdot 10^{-3}$$

Zeros (Hz)

$$s_2 := (-23.26 - i \cdot 23.56) \cdot 2 \cdot \pi \cdot 10^{-3}$$

$$s_3 := -180 \cdot 2 \cdot \pi \quad s_4 := -160 \cdot 2 \cdot \pi$$

$$s_5 := -80 \cdot 2 \cdot \pi$$

Очевидно, що така модель має 2 диференціюючі ланки (Zeros), коливальну ( $s_1, s_2$ ) та 3 аперіодичних ( $s_3, s_4, s_5$ ). Вона відповідає передаточній функції у вигляді

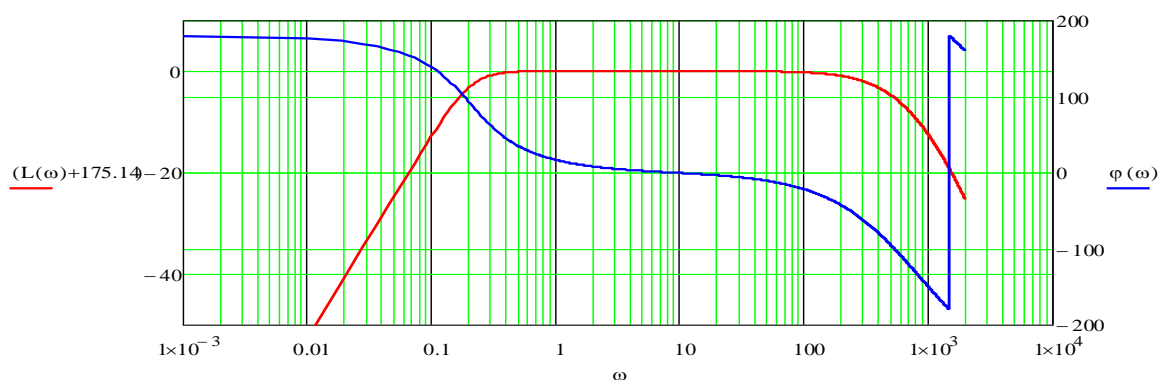


Рис.40 Нормалізовані частотні характеристики сейсмометра CMG-40TD

$$K(s) := \frac{(s)^2}{(s - s_1) \cdot (s - s_2) \cdot (s - s_3) \cdot (s - s_4) \cdot (s - s_5)} \quad (7)$$

Важливою є обернена задача – по експериментально визначеним частотним характеристикам визначити нулі і полюси досліджуваного приладу. Розглянемо її, виходячи із наступних міркувань.

1. Найбільш важливими є параметри досліджуваного приладу в смузі низьких частот (0,01...1) Гц.
2. Параметри сейсмометрів у смузі частот вище 50 Гц є менш важливими.
3. Елементи математичної моделі у смузі високих частот практично не впливають на неї у смузі низьких частот.

Аналіз показав, що найбільш зручним для цього є підхід, заснований на використанні АФЧХ із АФЧХ коливальної ланки (рис. 41)

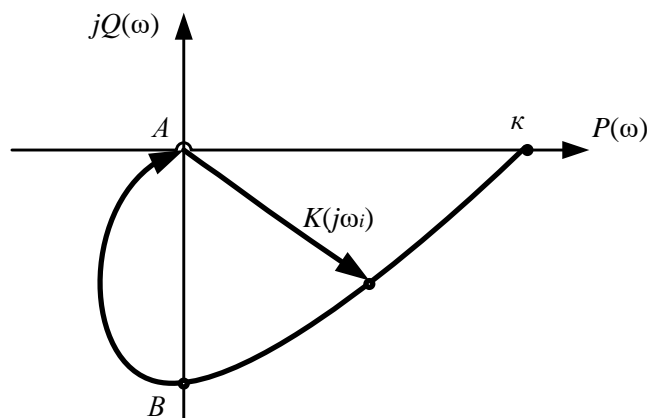


Рис.41 АФЧХ коливальної ланками із характерними точками

Її параметри визначаються наступним чином:

коефіцієнт передачі  $k = P(0)$ ;

постійна часу  $T = \omega_T^{-1}$ , де  $\omega_T$  визначається із умови  $P(\omega_T) = 0$ ,  $\omega_T \neq 0$ ;

відносний коефіцієнт затухання  $\xi$  визначається із умови  $k / 2\xi = l_{AB}$ , де  $l_{AB}$  - довжина відрізка  $AB$ .

Таким чином, передаточна функція буде визначена у вигляді

$$K(s) = \frac{k}{T^2 s^2 + 2\xi Ts + 1} = \frac{D(s)}{F(s)}. \quad (8)$$

Очевидно, що полюси  $s_1, s_2$  визначаються як корені рівняння  $F(s)=0$ . [21].

Розглянемо приклад ідентифікації параметрів сейсмометрів на основі експериментальних даних, отриманих на віброплатформі. Для цього використаємо дані, зображені на рис. 41. Із графіків можна зробити наступні висновки:

1. У смузі низьких частот ЛАЧХ має нахил -40дБ/дек, що свідчить про наявність двох нулів передаточної функції сейсмометра.

2. У смузі частот (0,5...20) с<sup>-1</sup> ФЧХ знаходиться практично на нульовому рівні, що свідчить про компенсацію ФЧХ двох диференціаторів, тобто в математичній моделі сейсмометра присутня коливальна ланка. Про це також свідчить детальний розгляд ЛАЧХ (рис. 40), який свідчить про наявність резонансу, тобто  $\xi < 1$ .



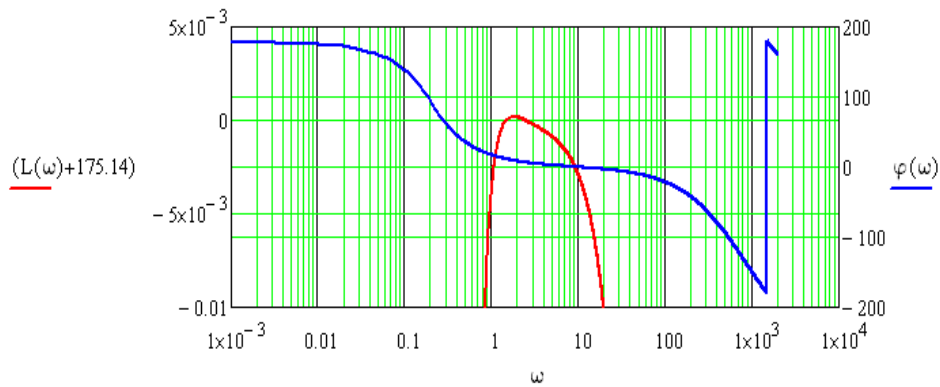


Рис.42 Наявність резонансу у смузі низьких частот (червона лінія)

3. У смузі високих частот наявні 3 чи більше аперіодичних ланок (фазове запізнення більше, ніж  $180^\circ$ ), але ці частоти знаходяться за ефективною смугою частот сейсмометра.

Необхідно зауважити, що експериментальні дані отримуються у вигляді масивів  $N(\omega_i)$ ,  $\varphi(\omega_i)$  та  $L(\omega_i)$ . Для того, щоб ідентифікувати параметри коливальної ланки, необхідно виконати перетворення  $N_k(\omega_i) = N(\omega_i) / \omega_i^2$  та  $\varphi_k(\omega_i) = \varphi(\omega_i) - 180$ , тобто виключити внесок двох диференціаторів. Графічно це зображено на рисунках 43, 44.

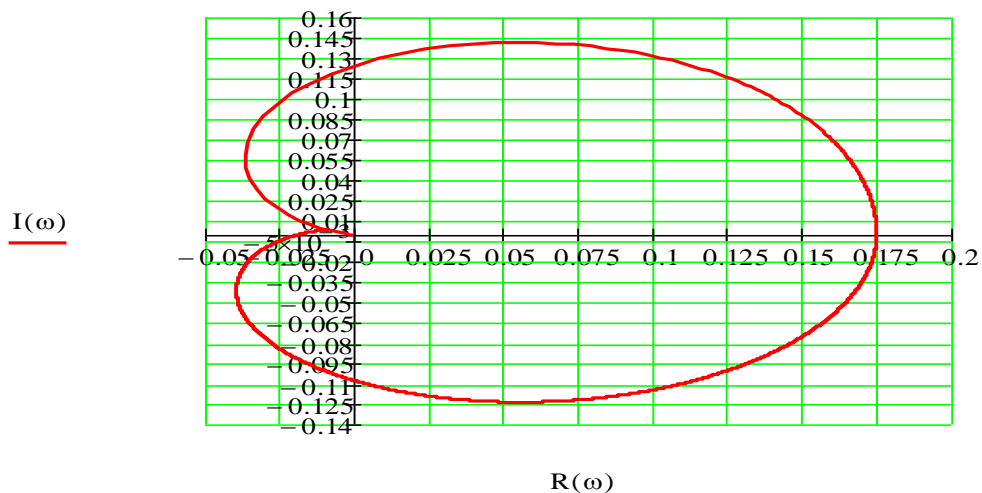


Рис. 43 АФЧХ сейсмометра по псевдо експериментальним даним

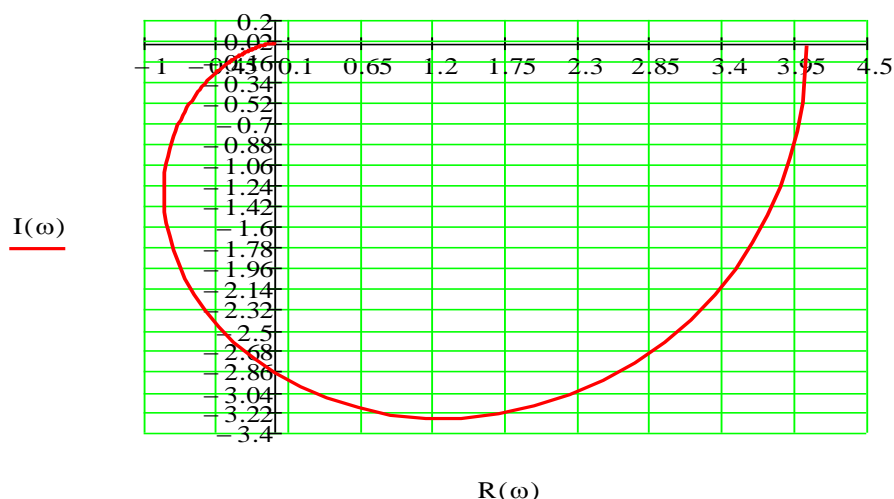


Рис.44 АФЧХ сейсмометра після виключення двох диференціаторів

При детальному розгляді АФЧХ встановлено, що умова  $P(\omega)=0$ , виконується при  $\omega_T=0,208 \text{ с}^{-1}$ , тобто  $T=4,807 \text{ с}$ . При цьому  $Q(\omega_T)=-2,875$ ,  $\kappa=4,044$ . Тобто  $\xi=0,703$ .

Згідно (8) полюси передаточної функції сейсмометра можна знайти як корені рівняння  $T^2 s^2 + 2\xi Ts + 1 = 0$ . Після обчислень отримаємо  $s_{1,2}=(-23,28 \pm i23,55) \cdot 2\pi \cdot 10^{-3}$ . При цьому відносна похибка вимірювання не перевищує 0,1%.[23]

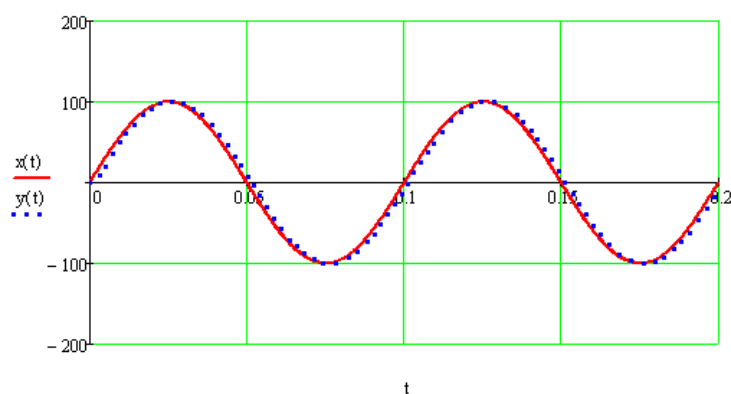
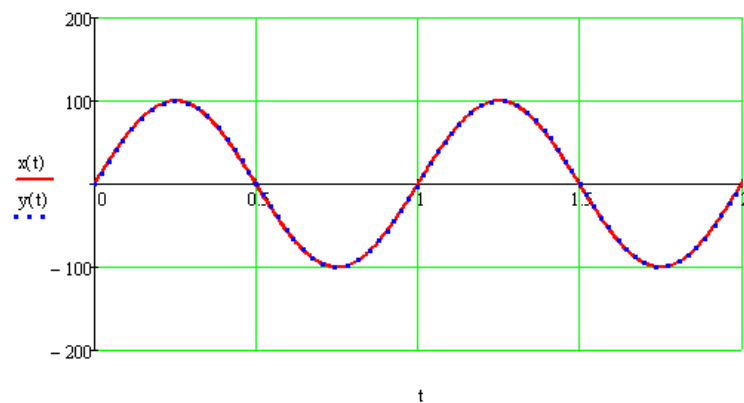
### 2.3.4 Результати експериментальних досліджень та їх аналіз

Точність позиціонування платформи на задане зміщення досліджувалася шляхом відпрацювання платформою зміщень в діапазоні  $\pm 50 \text{ мкм}$  із кроком у  $5 \text{ мкм}$ . Для перевірки повторюваності результатів вимірювань дослідження повторювалися 10 разів. Результати досліджень засвідчили відсутність усталеної похибки відпрацювання заданих зміщень у всьому динамічному діапазоні зміщень, що пояснюється наявністю астатизму 1 порядку у регулятора. Випадкова (шумова) складова похибка мала СКП, яка змінювалася практично лінійно від  $12 \text{ нм}$  до  $37 \text{ нм}$  при відпрацюванні зміщення від  $-50 \text{ нм}$  до  $50 \text{ нм}$ . Останнє пояснюється збільшенням шумів силового джерела живлення при його навантаженні (при відпрацюванні зміщення –  $50 \text{ нм}$  до актюаторів прикладається напруга  $-20 \text{ В}$ , а зміщенню в  $50 \text{ нм}$  відповідає напруга –  $610 \text{ В}$ ).

					МД.ПМ71.25.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

При перевірці динамічного і частотного діапазонів відпрацювання входних впливів встановлено наступне. Результати відпрацювання входних впливів в діапазоні частот (0,01 – 50) Гц і в діапазоні амплітуд (1 - 50) мкм практично повністю відповідають зображеним на рис. 45. Відмінність у відпрацюванні амплітуд не перевищувала 1% у всьому діапазоні частот і, звичайно, збільшувалася із збільшенням частоти. При наближенні до частоти 50 Гц спостерігалось фазове відставання коливань платформи до 40°.

На перший погляд такі результати насторожують, але вони не є визначальними. Це пояснюється тим, що при побудові частотних характеристик геофізичних приладів будуть використовуватися точно виміряні реальні коливання плити віброплатформи і відповідні реакції приладів, а не входні впливи на платформу.



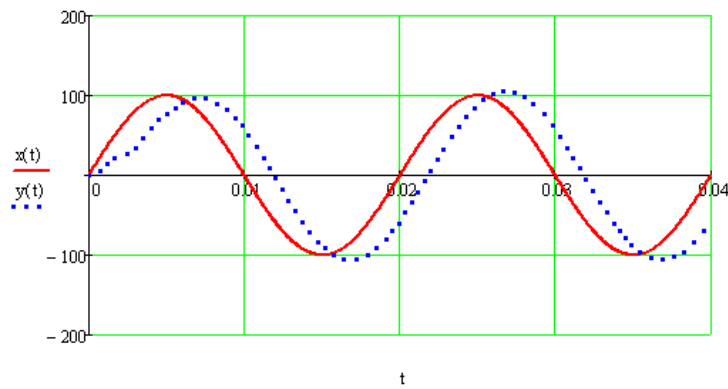


Рис.45 Результати моделювання системи формування вхідних впливів амплітудою 100 мкм на віброплатформу з частотою: а) 1Гц; б) 10 Гц; в) 50 Гц

Робота із реальним сейсмометром при визначенні його частотних характеристик є комплексним узагальнюючим випробуванням. Вона виконувалася шляхом встановлення на рухомій плиті удосконаленого сейсмометра із лазерним інтерферометричним відліком зміщень із роздільною здатністю не гірше 1 нм . На віброплатформу подавалися вхідні впливи різної амплітуди і частоти. Фіксуванню підлягали коливання рухомої плити віброплатформи і результат їх впливу на сейсмометр. Результати вимірювань зображені на наступних рисунках.

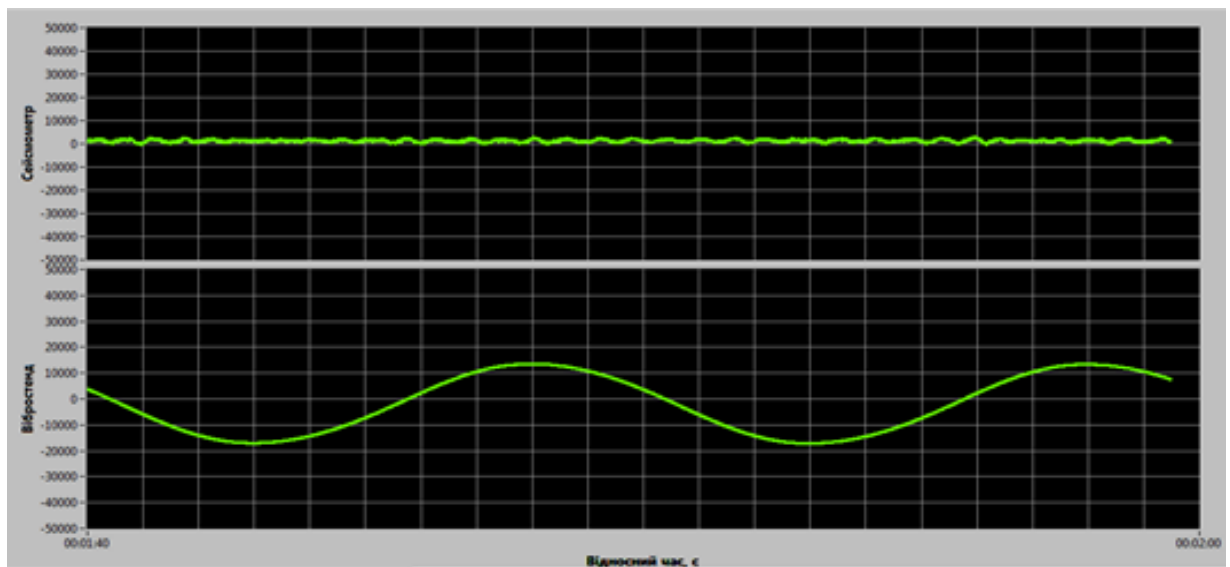


Рис.46 Реакція сейсмометра на коливання частотою 0,1 Гц при амплітуді 15 МКМ

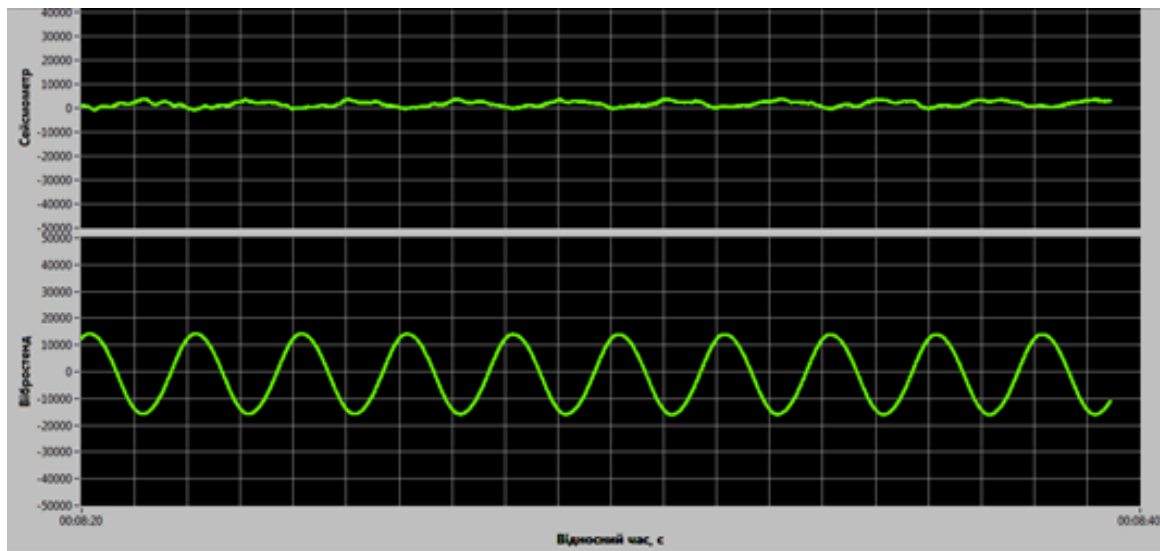


Рис.47 Реакція сейсмометра на коливання частотою 0,5 Гц при амплітуді 15 МКМ

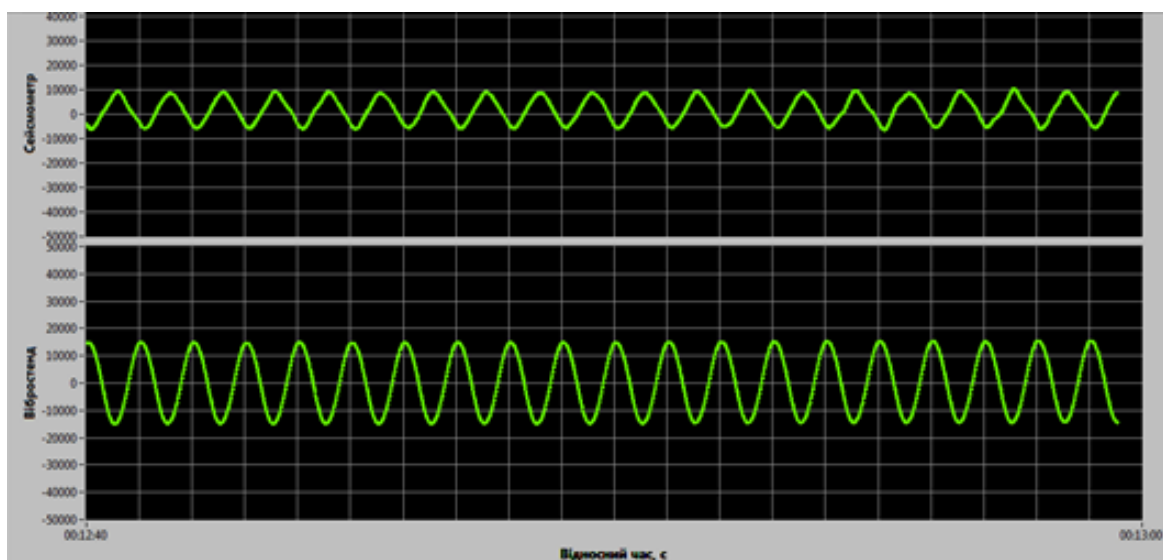


Рис.48 Реакція сейсмометра на коливання частотою 1 Гц при амплітуді 15 мкм

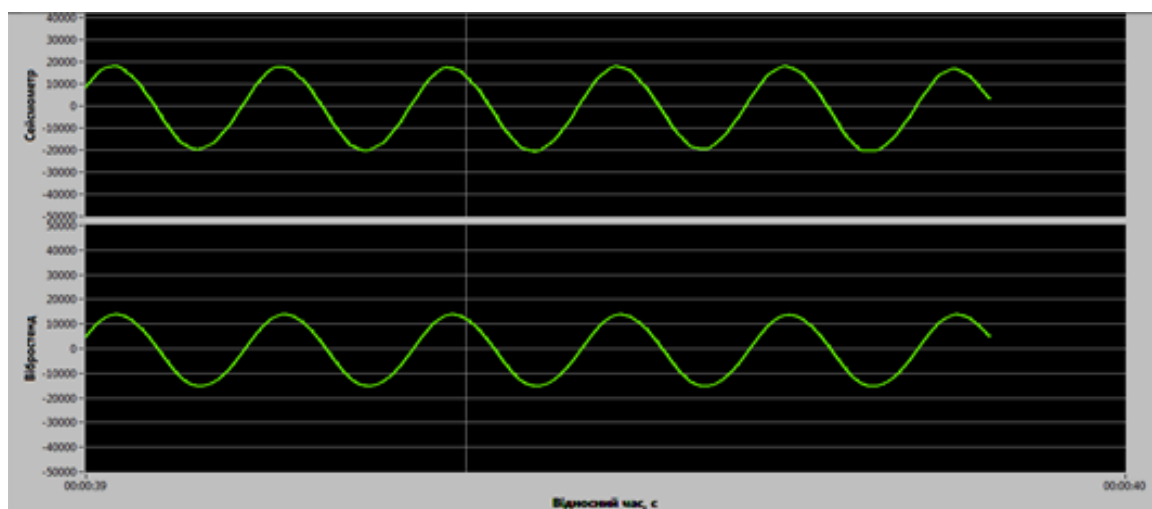


Рис.49 Реакція сейсмометра на коливання частотою 5 Гц при амплітуді 15 мкм

					МД.ПМ71.25.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

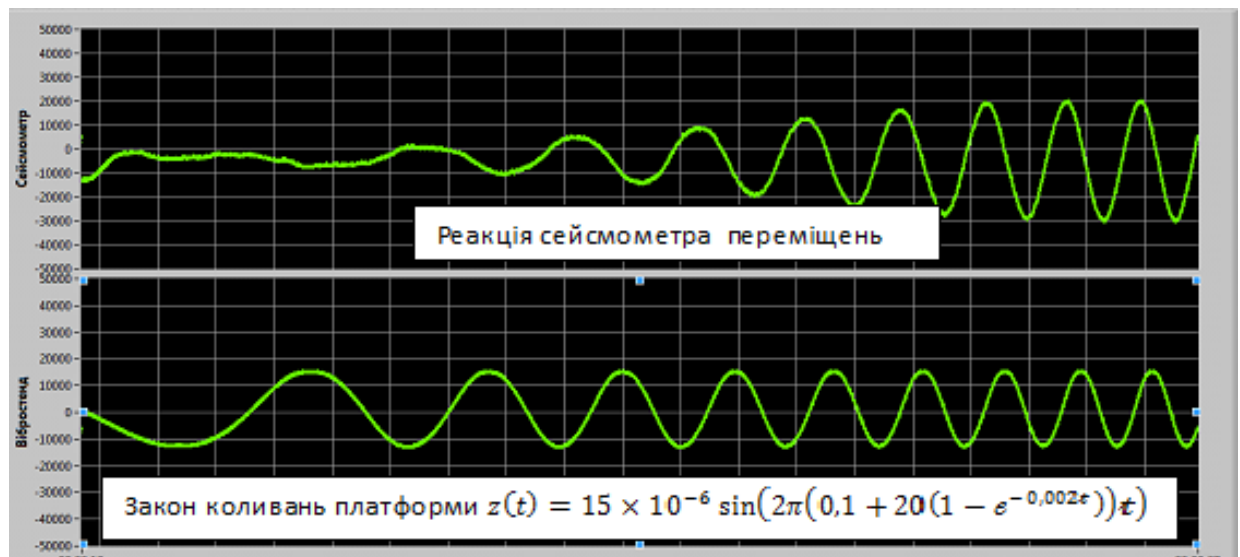


Рис.50 Реакція сейсмометра на коливання із змінною частотою при амплітуді 15 мкм (область низьких частот)

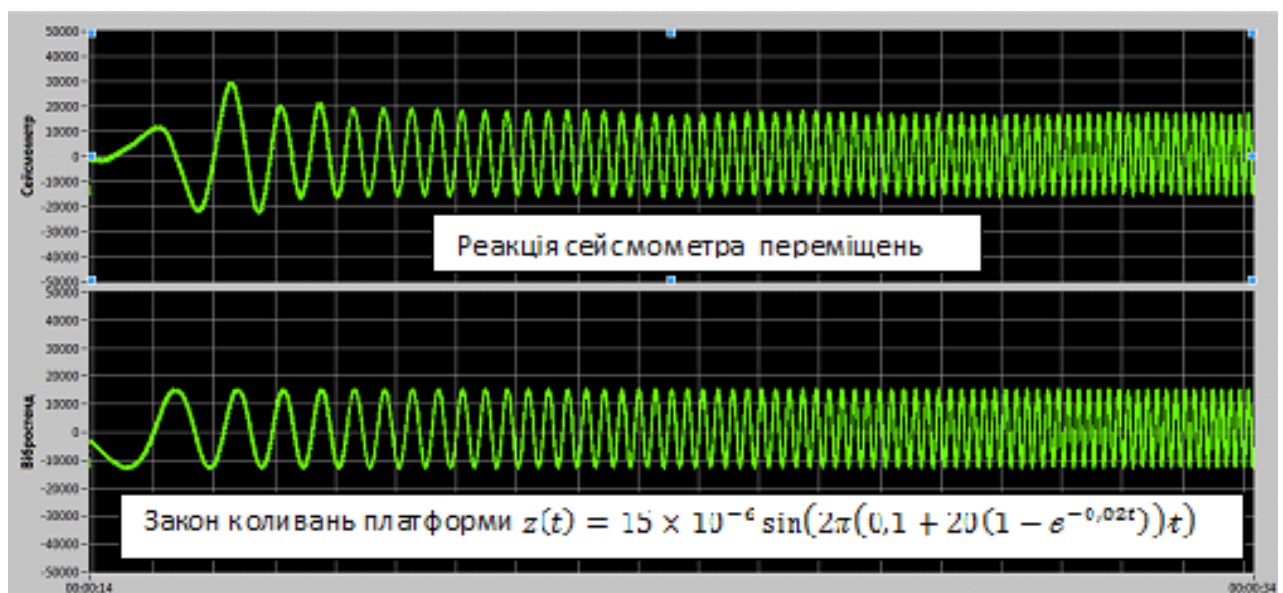


Рис.51 Реакція сейсмометра на коливання із змінною частотою при амплітуді 15 мкм (область середніх частот)

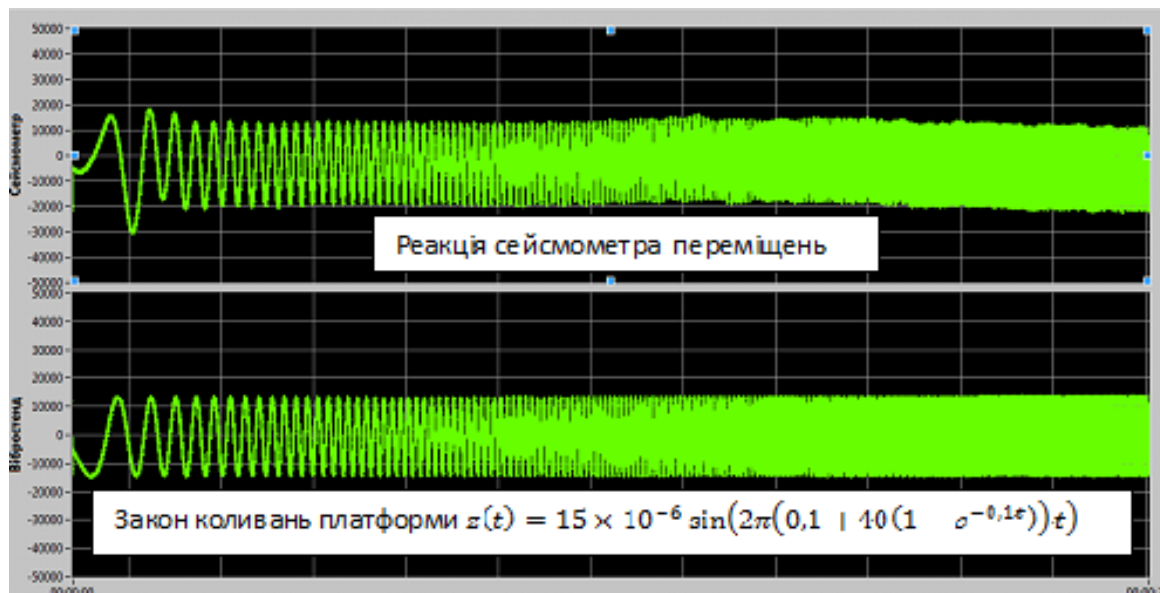


Рис.52 Реакція сейсмометра на коливання із змінною частотою при амплітуді 15 мкм (область високих частот)

Аналізуючи результати, зображені на рис (46-52), можна зробити наступні висновки:

- сейсмометр практично не реагує на коливання з частотою 0,1 Гц;
- сейсмометр починає реагувати на коливання з частотою 0,5 Гц із запізненням по фазі у 180°;
- на частоті 1 Гц спостерігається зростання амплітудно-частотної характеристики, запізнення по фазі у 180° зберігається, спостерігається нелінійність статичної характеристики при амплітуді коливань в 1 мкм;
- на частоті 5 Гц спостерігається явище резонансу, запізнення по фазі практично зникає.

В узагальненому вигляді реакції сейсмометра можна спостерігати на фото (рис. 50-52), де частота коливань платформи змінювалася в діапазонах (0,1 - 20) Гц та (0,1 - 40) Гц по експоненціальному закону[23].

## 2.4. Аналіз отриманих результатів та висновки по адекватності розробленої моделі.

В створеній геофізичній метрологічній віброплатформі застосовано розроблені лазерні інтерферометричні комплекси, побудовані за схемою, інтерферометра Майкельсона. Оптичні сигнали утворюються в інтерферометрі за рахунок режиму змішаних хвиль, тобто інтерференції променів, відбитих від рухомого і нерухомого відбивачів. Рухомі відбивачі розташовані на плиті, що коливається в двох напрямках по осі  $X$  та по осі  $Z$ . При переміщенні кутового відбивача з фотоприймачів знімаються сигнали, близькі до синусоїдальних, які відрізняються один від одного по фазі на  $\pi/2$ , що необхідно для визначення напрямку переміщення.

Різниця фаз пов'язана з різницею ходу  $\Delta X$  співвідношенням

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi \cdot \Delta X}{\lambda}, \quad (9)$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі когерентного джерела світла.

Фотоприймачі, які розміщені на шляху сумарної хвилі, перетворюють інтенсивність вихідного сигналу інтерферометра в електричний сигнал:

$$U_1(t) = U_0 + U_M \cdot \sin(\varphi_0 + \varphi_m \cdot \sin(2\pi \cdot f_M t)) \quad (10)$$

$$U_2(t) = U_0 + U_M \cdot \cos(\varphi_0 + \varphi_m \cdot \sin(2\pi \cdot f_M t)), \quad (11)$$

де  $U_0$  – постійна складова сигналу,  $U_M$  – амплітуда,  $f_M$  – частота модуляції.

Фаза  $\Delta\varphi(t) = \varphi_0 + \varphi_m \cdot \sin(2\pi \cdot f_M t)$  пов'язана з миттєвим значенням вихідного сигналу фотоприймачів  $U_1(t)$  і  $U_2(t)$  через функцію  $\arccos \Delta\varphi(t)$ , яка однозначно визначена тільки на інтервалі  $[0, 2\pi]$ .

У зв'язку із цим з (9) і (10-12) впливає стосовно до двопробного інтерферометра Майкельсона, що переміщення, яке вимірюється дорівнює

$$\Delta X = \left( N + \frac{\Delta\varphi(t)}{2\pi} \right) \cdot \frac{\lambda}{2}, \quad (12)$$

					МД.ПМ71.25.000ПЗ	Арк.
						65
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



де  $N$  – ціле число інтервалів  $[0, 2\pi]$  приростів фази сигналу фотоприймача при переміщенні відбивача інтерферометра в інтервалі  $\Delta X$  і позначає цілі порядки інтерференції;  $\Delta\varphi(t)$  – зміна фази в межах інтервалу  $[0, 2\pi]$ . [22]

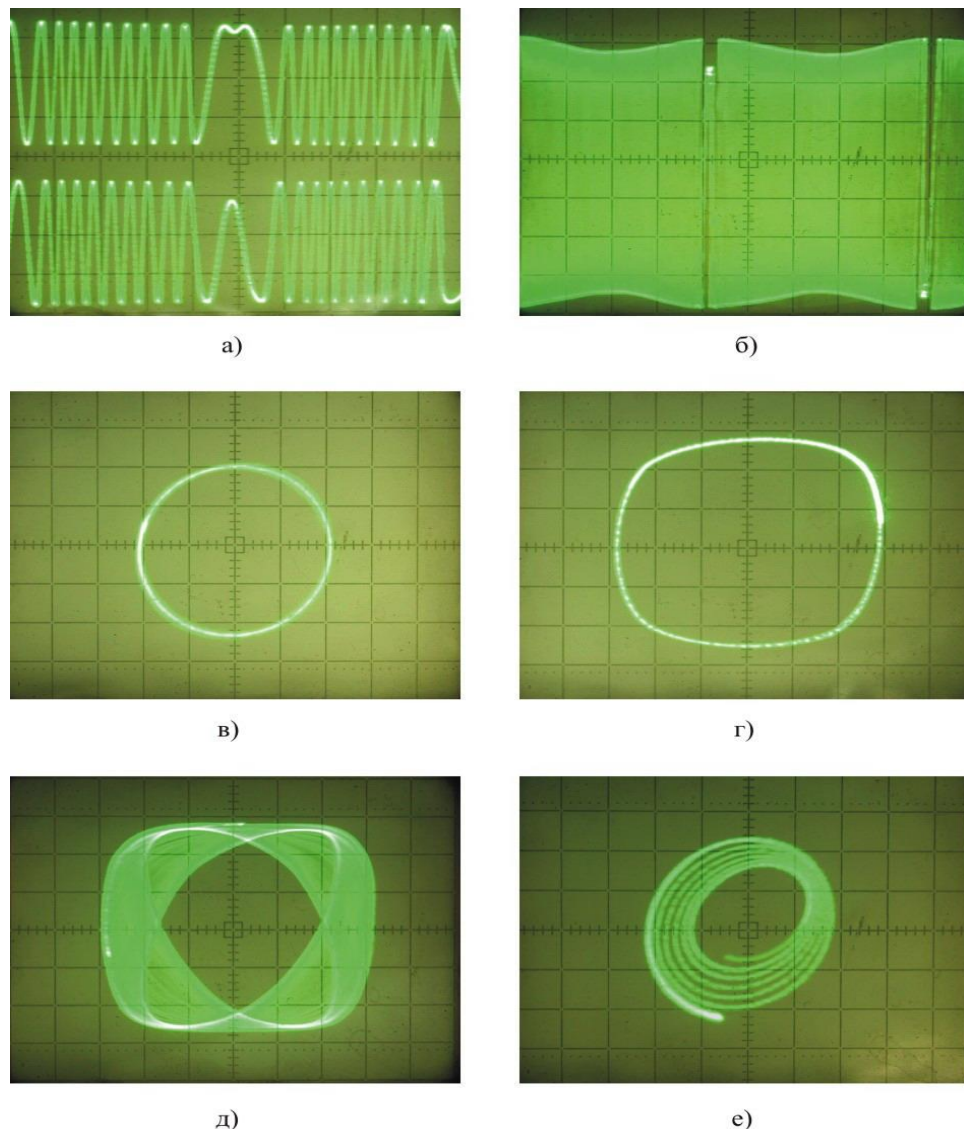


Рис.53 Сигналограми інтерференційних сигналів

На рис. 53а представлені сигналограми квадратурних інтерференційних сигналів, отриманих на екрані осцилографа, при коливаннях плити віброплатформи п'єзоактюатором.

При підключенні одного з квадратурних сигналів на вхід каналу «Y» осцилографа, а іншого на вхід зовнішнього каналу розгортки «X» на екрані осцилографа спостерігаються так звані фігури Лісажу. На рис. 53в зображено коло на екрані осцилографа, яке утворюється за допомогою тих же квадратурних інтерференційних сигналів, представлених на рис 53а.

					МД.ПМ71.25.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

Експериментальні дослідження показали, що при амплітуді коливань плити більше 50 мкм в квадратурних інтерференційних сигналах присутня паразитна амплітудна модуляція (рис. 53б) з частотою рівною частоті коливань плити і обумовлена втратою частини світлового потоку в плечах інтерферометра. При цьому на екрані осцилографа в режимі зовнішньої розгортки, замість кола представлено фігуру (рис. 53д), яка утворена обертанням та стисканням кола.

Це явище викликано тим, що при коливаннях плити в вертикальному чи горизонтальному напрямку плита здійснює складне побічне коливання з малою амплітудою, при цьому кутові відбивачі (рухомий і нерухомий) орієнтуються так, що одне з їх ребер й оптична вісь не лежать в площині, паралельній вектору поляризації падаючого на них випромінювання. При переміщенні плити в горизонтальному напрямку по осі  $X$  на 100 мкм плита підіймається по осі  $Z$  на протилежній (стосовно актюатора) стороні плити на 40 мкм, утворюючи кут  $0,24^\circ$  (кутових секунд). При переміщенні плити в вертикальному напрямку по осі  $Z$  на 100 мкм кут нахилу плити стосовно осі  $X$  дорівнює  $2,1^\circ$  (кутових секунд).

При коливаннях плити в горизонтальному напрямку амплітудою 100 мкм квадратурні інтерференційні сигнали з виходу інтерферометра вертикального каналу на екрані осцилографа утворюють таку фігуру Лісажу (рис. 53г). А при коливаннях плити в вертикальному напрямку амплітудою 100 мкм квадратурні інтерференційні сигнали з виходу інтерферометра горизонтального каналу на екрані осцилографа утворюють спіраль Архімеда (рис. 53е). Аналіз зображення

спіралі показує, що спіраль з рівномірним кроком, один виток дорівнює  $\lambda/2$  довжини хвилі лазера ( $\approx 320$  нм) [23].

Отримані на екрані осцилографа фігури (округлений квадрат та спіраль) є результатом взаємодії роботи п'єзоактюаторів відповідного каналу і аналізом квадратурних інтерференційних сигналів в іншому каналі, але, зважаючи на те, що одночасно працює лише один канал, це не вплине на загальне використання віброплатформи.

Розроблена та виготовлена віброплатформа є прецизійним обладнанням, якому немає аналогів в Україні, а із урахуванням впроваджених методів цифрової лазерної інтерферометрії, можна стверджувати про її унікальність.

### 3. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ

#### 3.1 Опис ідеї проекту

Розглянувши в попередніх розділах структуру систем повірки та калібрування сейсмометрів, виконавши моделювання віброплатформи, запропоновано створення вітчизняного аналогу. Ідея проекту полягає в розробці віброплатформи яка може в автоматичному режимі робити повірку геофізичних приладів і проводити іспити надійності, що уточнено наведено в табл.3.1

Таблиця 3.1. Опис ідеї стартап проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Повірка та калібрування автоматичному режимі	Сертифікація геофізичних приладів	1. Прискорення повірки і калібрування виробів 2. Покращення якості продукту
	Іспити надійності приладів	1. Підвищення довговічності і надійності виробів. 2. Покращення якості продукту

					МД.ПМ71.25.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

	Приладобудування	1. Підвищення довговічності і надійності виробів 2. Виготовлення виробів в заданий термін
--	------------------	--

Отже, пропонується новий спосіб автоматизованого калібрування і повірки геофізичних приладів, який допоможе зменшити вплив людського фактору, підвищити довговічність і надійність виробів, покращити якість продукту та прискорить процес проведення цієї процедури.

Далі проводимо аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї порівняно із пропозиціями конкурентів:

- визначаємо перелік техніко-економічних властивостей та характеристик ідеї;
- визначаємо попереднє коло конкурентів (проектів-конкурентів) або товарів-замінників чи товарів-аналогів, що вже існують на ринку, та проводимо збір інформації щодо значень техніко-економічних показників для ідеї власного проекту та проектів-конкурентів відповідно до визначеного вище переліку;
- проводимо порівняльний аналіз показників: для власної ідеї визначено показники, що мають а) гірші значення (W, слабкі); б) аналогічні (N, нейтральні) значення; в) кращі значення (S, сильні) (табл. 3.2).

Таблиця 3.2. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабкі а сторон а)	N (нейтральна сторон а)	S (сильні а сторо на)
		Мій проект	Волна ВС4	СТ-EW1	РЕТ-0А і РЕТ-03Н			
1.	Вартість програмного забезпечення	Низька	Немає	Немає	Немає			+

					МД.ПМ71.25.000ПЗ	Арк.
						69
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.	Показник скорочення часу	Високий	Низький	Низький	Низький			+
3.	Якість іспиту	Висока	Низька	Низька	Низька			+
4.	Патенти на продукт	є	є	є	є		+	
5.	Торгова марка	Немає	є	є	є	+		

Після порівняння характеристик проекту з конкурентами був визначений перелік слабких, сильних та нейтральних характеристик і властивостей ідеї потенційного товару, що є підґрунтям для формування його конкурентоспроможності. Товар є захищеним від копіювання за рахунок патенту на винахід.

### 3.2 Технологічний аудит ідеї проекту

В межах даного підрозділу проводимо аудит технології (мови програмування), за допомогою якої можна реалізувати ідею створення проекту.

Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз складових які вказані в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3. Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1.	Швидка перевірка виробів	Технологія планування виробництва	Наявні	Недоступні
2.	Легка адаптивність до зміни виробів	Технологія планування виробництва	Наявні	Недоступні

Проаналізувавши таблицю можна зробити висновок, що наш проект можна реалізувати тому що всі необхідні технології реалізації даних ідей наявні, але не має можливості їх реалізувати через те що необхідна велика сума коштів. Тому необхідно залучати інвесторів для реалізації даного проекту.

### 3.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап проекту

Визначимо ринкові можливості, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкові загрози, які можуть перешкодити його реалізації.

Це дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів.

Спочатку проведемо аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку (таблиця 3.4).

Таблиця 3.1. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	10
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	500 000
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Немає
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Присутні
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	40

За попереднім оцінюванням ринок має зростаючу динаміку і хороший попит на запропонований нами продукт, тому робим висновок, що ринок є привабливим для входження, хоча на ньому вже існують і іноземні фірми, які працюють багато років, але за рахунок нової технології, нової конструкції і переваг, які надає наш продукт він стає конкурентоспроможними.

Надалі визначаємо потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та формуємо орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи (табл. 3.5).

Таблиця 3.2. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

Потреба, що формуює ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
Якісне калібрування і повірка приладів	Заводи, інститути та фірми які займаються геофізичними приладами	Різне призначення	Скорочення часу перевірки, швидка зміна приладів, уніфікація.

Отже потенційною групою клієнтів продукту мають стати заводи, інститути та фірми які займаються повіркою, калібруванням, виготовленням геофізичних приладів.

При застосуванні даної технології існують певні загрози. (таблиця 3.6). Для уникнення таких ситуацій потрібні висококваліфіковані фахівці, які зможуть контролювати роботу віброплатформи. Також, потрібне своєчасне технічне обслуговування даної платформи.

Таблиця 3.3. Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Старіння	Поява модернізованої продукції	Моніторинг трендів, постійна модернізація згідно з вимогами ринку
2.	Відсутність попиту на продукцію	Не бажання споживачів переходити на нову технологію	Реклама. Приведення аргументованих доказів, що зміна технології приведе до збільшення попиту на продукт.
3.	Обслуговування	Ймовірність збоїв при роботі програми	Своєчасна підтримка в мережі інтернет
4.	Технічний	Мало спеціалістів в даній області	Впровадження постійної підтримки кваліфікованих техніків
5.	Конкуренція	Широкий асортимент продукції конкурентів	Доведення на практиці, що технологія буде економічно вигіднішою, ніж у конкурентів

В таблиці 3.6 ми визначили фактори загроз які перешкоджають ринковому впровадженню нашого проекту, а також можливу реакцію на фактор щоб звести до мінімуму його вплив.

Таблиця 3.4. Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Попит	Потреба вчасне вдосконалення продукту	Модернізація продукту, розробка нових ідей
2.	Політико правові	Може вплинути на купівлю/продаж товару.	Зміна напрямків імпорту
3.	Економічні	Політика протекціонізму; підтримка інноваційного виробництва.	Підвищення/пониження ціни на продукт; зменшення податкового тиску
4.	Інформаційні	Можливість придбати продукт на віддаленій відстані	Зробити акцент на якості продукції
5.	Науково-технічні	Зміниться технологія виготовлення товару	Впровадить технологію і змінить вартість товару

В таблиці 3.7 ми визначили фактори можливостей які сприяють ринковому впровадженню нашого продукту, а вигоди які компанія може отримати відповідно від реакції на той чи інший фактор.

В таблиці 3.8 потрібно провести аналіз конкуренції на ринку.

Таблиця 3.5. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1.Монополія	В галузі домінує одна фірм	Виготовлення вдосконаленого товару
2.Національний	Конкуренція фірм на міжнародному рівні	Реклама продукції. Створення сайту на різних мовах
3. Міжгалузева	Виробники виготовляють продукти, які задовольняють різні потреби	Виготовлення товару відмінного в якості, ціні
4. Товарно-видова	Різноманітні товари для задоволення конкретної потреби	Розробка нових технологій
5. Цінов	Використання ціни як засіб кращих умов збуту.	Підвищення якості продукту, за такою ж ціною, що і у конкурентів
6. Не марочна	Вказує, хто відповідальний за готовий продукт	Створення власної марки не важливе.

В даній таблиці ми проаналізували ринок збуту нашого продукту і визначили загальні риси конкуренції на ньому.



Після аналізу конкуренції проведемо більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі.(табл.3.9)

Таблиця 3.6. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	Волна BC4, CT-EW1, PET-0A і PET-03H	Товари у конкурентів.	Значення розміру поставок.	Розмір закупівель, торговельні знаки.	Ціна марки в конкурентів
Висновки:	Інтенсивність конкуренції прийнятна. Більшість фірм отримують цілком помірний прибуток.	Присутні можливості входу в ринок за рахунок нової технології та інвестицій.	Не диктують	Диктують. Вимоги до ціни і якості продукту	Велика кількість товарів замінників

Отже, відповідно до наведеного вище аналізу головними силами, які діють на конкуренцію в галузі є постачальники і споживачі. Також все більшого значення набуває інтенсивність конкуренції між існуючими конкурентами. Таким чином в межах структурного підходу до аналізу конкуренції тип конкуренції – монополістична конкуренція

Після всіх аналізів визначається та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності.

Таблиця 3.7. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Надійність	Більша надійність продукту, ніж у конкурентів
2	Швидка зміна виробництва	За рахунок великої БД з великою кількістю технологічних операцій
3	Якість	Вище перелічені фактори покращують якість продукту, а це один із головних критеріїв у клієнтів
4	Ціновий	Опрацювання відгуків клієнтів, вдосконалення відповідно до їх пропозицій та за можливості зниження ціни на продукт
5.	Новизна	Нова технологія дозволяє продукту стати конкурентоспроможними на ринку

Таблиця 3.8. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «Віброплатформи зразкової»

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з віброплатформною зразковою.						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Наявність патентів	16				+			
2	Велика кількість постачальників	15				+			
3	Висока якість	17	+						
4	Технічна підтримка	19		+					
5.	Ціна	14			+				

З таблиць 3.10 та 3.11 бачимо, що фактори конкурентоспроможності суттєві та мають великий позитивний внесок при впровадженні нового програмного забезпечення для розрахунку концентрації пилу. Основною перевагою та головним досягненням є висока якість продукту та технічна підтримка на протязі всього терміну його використання споживачем.

Таблиця 3.9. SWOT- аналіз стартап проекту

<p><b>Сильні сторони:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• більший оптимізована програма, ніж у конкурентів;</li> <li>• краща якість продукту;</li> <li>• ціна така ж як і у конкурентів;</li> <li>• наявність патентів дозволяє споживачу бути впевненим у якості продукту.</li> </ul>	<p><b>Слабкі сторони:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• продукт який ще не зарекомендував себе на ринку;</li> <li>• необхідно проводити рекламу свого продукту і збільшувати кількість його постачальників.</li> </ul>
<p><b>Можливості:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• потреба у збільшення надійності і довговічності інструменту, тим самим</li> <li>• отримання нових замовлень на продукт;</li> <li>• збільшення продаж;</li> <li>• отримання державних замовлень на отримання послуг;</li> <li>• розширення ринку за рахунок іноземних замовників.</li> <li>• Збільшення продаж;</li> <li>• Розширення ринку за рахунок іноземних замовників;</li> <li>• Зменшення податкового тиску, отримання тендерів на послуги.</li> </ul>	<p><b>Загрози:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• широкий асортимент продукції конкурентів;</li> <li>• поява якісніших технологій у конкурентів;</li> <li>• Різка зміна курсу гривні може привести до зменшення попиту, особливо з боку малих фірм.</li> <li>• Політичні та економічні ризики ведення бізнесу;</li> <li>• втрата клієнтів через недостатню технічну підтримку</li> <li>• не бажання споживачів переходити на нову;</li> </ul>

На основі SWOT-аналізу розробляємо альтернативи ринкової поведінки для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок.

Таблиця 3.10. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) поведінки ринкової	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Стратегія нейтралізації ринкових загроз сильними сторонами стартапу	Висока	1 рік
2	Стратегія компенсації слабких сторін наявними ринковими можливостями	Висока	2 роки
3	Стратегія виходу з ринку	Низька	2 роки

З зазначених альтернатив обираємо стратегію компенсації слабких сторін стартапу наявними ринковими можливостями.

### 3.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів.

Таблиця 3.11. Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Державні підприємства	Готові	Середній попит	Висока	Складна
2	Приватні підприємства			Низька	Легка
3	Інститути			Середня	Середня
Які цільові групи обрано: Приватні підприємства і інститути					

За результатами аналізу потенційних груп споживачів ми обрали цільові групи для яких будемо пропонувати свою програму для оптимізації робочих центрів та визначили стратегію охоплення ринку: стратегію диференційованого

маркетингу, тому що працюємо із конкретним сегментом, розробляючи для нього програму ринкового впливу.

Для роботи в обраному сегменті ринку необхідно сформувати базову стратегію розвитку.

Таблиця 3.12. Визначення базової стратегії розвитку

Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
Підсилення сильних сторін стартапу за рахунок ринкових можливостей	Надання товару важливого з точки зору споживача властивостей, які роблять товар відмінним від товарів конкурентів	Найкращі задіяні робочі центри, велика БД, виготовлення виробу в термін. Ціна така, як і у конкурентів. Якісний продукт, до якого прихильні споживачі, постійний зворотній зв'язок з клієнтами.	Стратегія диференціації

За базову стратегію розвитку було взято стратегію диференціації, що передбачає надання товару важливих з точки зору споживача відмінних властивостей, які роблять товар відмінним від конкурентів.

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (табл. 3.16).

Таблиця 3.13. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
	Не є першопрохідцем	Буде шукати нових споживачів	Не буде копіювати	Стратегія заняття конкурентної ніші

За базову стратегію конкурентної поведінки була прийнята стратегія зайняття конкурентної ніші, коли компанія в якості цільового ринку вибирає один або декілька ринкових сегментів малого розміру. Головне завдання компанії при цьому – це постійна турбота про підтримку і розвиток своєї конкурентної переваги, формування лояльності і прихильності споживачів, підтримка вхідних бар'єрів.

На основі вимог споживачів з обраного сегменту до постачальника і продукту, а також в залежності від стратегії розвитку та стратегії конкурентної поведінки розробляємо стратегію позиціонування яка визначається у формування ринкової позиції, за яким споживачі мають ідентифікувати проект

Таблиця 3.14. Визначення стратегії позиціонування

Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Висока оптимізація і вчасне виготовлення виробів –</li> <li>- Вдосконалення продукту враховуючи побажання споживачів</li> </ul>	Стратегія диференціації	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Краща якість ніж у конкурентів за такою ж ціною.</li> <li>- Формування лояльності і прихильності споживачів</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Надійність</li> <li>- Стабільність</li> <li>- Точність</li> <li>- Якість.</li> <li>- Зворотній зв'язок із виробником.</li> <li>- Технічна підтримка.</li> </ul>

Компанія за стратегію розвитку обрала диференціацію, і за цільові групи було обрано державні та приватні підприємства, хоча у них вже є постачальники, але за рахунок нової технології компанія буде забирати клієнтів у конкурентів, і проводити підтримку та реалізовувати розвиток своєї конкурентної переваги

### 3.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Під час розроблення маркетингової програми першим кроком є розробка маркетингової концепції товару, який отримає споживач. У таблиці 3.18 підсумовуємо результати аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 3.15. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
Потреба програмному забезпеченні, виготовлення виробів в термін	краща якість продукту; ціна така ж як і у конкурентів;	Постійна технічна підтримка та оновлення. Вдосконалення алгоритму розрахунків та його вдосконалення. Вдосконалення програми шляхом додавання нових можливостей і методів розрахунків.

За рахунок ключових переваг товару і стратегії диференціації, що передбачає надання товару важливих з точки зору споживача відмінних властивостей за такою ж ціною як і у конкурентів буде розроблено маркетингову програму стартап-проекту.

Таблиця 3.16. Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Віброплатформа для калібрування і повірки геофізичних приладів. Можна виділити наступні вигоди використання: - виготовлення виробів в термін; - швидкий процес іспиту; - підвищення якості продукції.		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1.Довговічність	Нм	Вр
	2. Економічні	Нм	Вр
	3. Призначення	М	Тх
	4. Надійність	М	Тл
	5.Технологічні	М	Тх
	6. Транспортабельності	М	Тх
	Якість: відповідає нормам		
Пакування: у дерев'яний контейнер			
Марка: немає			
III. Товар із підкріплення м	Реклама		
	Реклама		
За рахунок патенту товар буде захищено			

В таблиці 3.19 ми створюємо трьох рівневу модель нашого товару, що включає задум товару та його вигоди, основі характеристики готового товару, спосіб його пакування та захисту від копіювання та плагіату.

Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватися при встановленні ціни на потенційний товар, це передбачає аналіз цін товарів конкурентів, та доходів споживачів продукту (табл. 3.20).

Таблиця 3.17. Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
	300000	200000	середній	100000-700000

В таблиці проаналізовано ринкові ціни на товари аналоги та замінники, а також середній рівень доходів споживачів. За отриманими даними буде встановлена верхня та нижня межа на нашу програму.

Таблиця 3.18. Формування системи збуту

Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
Звична купівля з деяким змінами, або модифікована закупівля. Вона передбачає придбання дещо змінених товарів (послуг), або зміну ціни на товар (послугу), або зміну кількості постачання.	Доставка товару покупцю, його встановлення та налаштування.	Канал нульового рівня	Власна система збуту. Виробник безпосередньо продає товар клієнту і використовує три способи прямого продажу : -Торгівля через магазини -Посилкова торгівля -Торгівля в роздріб

Спираючись на специфіку закупівельної поведінки цільових клієнтів було обрано власну систему збуту. Також заглибину каналу збуту було обрано канал нульового рівня, тому що компанія хоче мати тісні контакти із споживачами на обмеженому цільовому каналі.

Таблиця 3.19. Концепція маркетингових комунікацій

Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
Перегляд інформаційний ресурсів із потрібним якісним товаром за доступною ціною.	Інтернет ресурси, виставки, рекламні статті	Послідовність у реалізації обраної позиції. Доступність та об'єктивність інформації про фірму та товар.	Інформаційне завдання про новий товар, та формування знань про марку та виробника.	Висока якість і швидке повірка виробів.

Висока якість і швидка повірка виробів є головною концепцією товару, за рахунок яких він є конкурентоспроможним на ринку. Спираючись на специфіку закупівельної поведінки цільових клієнтів було обрано власну систему збуту, коли виробник безпосередньо продає товар клієнту. Ціноутворення відбувається на основі аналізу товарів – аналогів і відбувається під час фінансово-економічного аналізу проекту з залученням експертів.

### 3.6 Висновки

Узагальнюючи проведений аналіз стартап проекту можна зробити висновок, що даний товар має попит на ринку, і може конкурувати з аналогами. На даний момент існує декілька іноземних аналогів, які не в повній мірі задовольняють клієнта.

Ціль даного стартап проекту донести до інвестора те, що даний товар кращий, чім у іноземних аналогів, та показати, що при інвестиціях даного проекту, вони отримають продукт який допоможе якісніше повірити геофізичні прилади, та навіть відкривати скриті функції цих приладів яких навіть не знав виробник.

Клієнти на даному ринку довіряють іноземним виробникам, а вони не обслуговують свій товар у повній мірі. У даному проекті товар буде обслуговуватись та буде мати змогу оновлювати своє програмне забезпечення і мати постійну підтримку.

Спираючись на специфіку закупівельної поведінки цільових клієнтів і розробивши власну систему збуту є хороші перспективи впровадження даного продукту на ринок. Впровадження на ринок розроблена на основі стратегії зайняття конкурентної ніші, коли компанія в якості цільового ринку вибирає один або декілька ринкових сегментів малого розміру. Отже, подальша імплементація продукту є доцільною за рахунок сильних сторін продукту і наявного попиту на ринку.

Спираючись на специфіку закупівельної поведінки цільових клієнтів було обрано власну систему збуту, коли виробник безпосередньо продає товар клієнту.

					МД.ПМ71.25.000ПЗ	Арк.
						81
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



## Загальні висновки.

У даній магістерській дисертації встановлено, що не зважаючи на значну кількість геофізичних приладів вони відсутні у Державному реєстрі засобів вимірювальної техніки.

Аналіз доступних існуючих засобів метрологічної атестації геофізичних приладів показав, що головним їх недоліком є низька точність вимірювальних систем, які базуються на ємнісних чи індуктивних перетворювачах. Такі прилади не придатні для перевірки та калібрування сучасних сейсмометрів.

Досліджено двохкоординатну віброплатформу із вимірювальною системою на основі цифрової лазерної інтерферометрії і приводом рухомої частини на основі силових п'єзоактюаторів і прийшли до висновку, що її можна рекомендувати використання розробленої платформи у наступних напрямках:

- метрологічна атестація існуючих геофізичних приладів, які використовуються у геофізичних спостереженнях;
- метрологічна атестація геофізичних приладів, які закупуються за кордоном і без чого не можуть використовуватися на законних підставах;
- у дослідницьких цілях при розробці власних геофізичних приладів.

Окремим напрямком використання віброплатформи може бути визначення параметрів сейсмічної вразливості споруд на основі дослідження їх фізичних моделей, а також для іспитів з другими приладами.

При виконанні магістерської дисертації проведена перевірка адекватності математичних моделей силових п'єзоактюаторів умовам функціонування віброплатформи і розроблені драйвери силових п'єзоактюаторів.

Результати, отримані в ході розробки віброплатформи, може бути покладено в основу побудови повномасштабних віброплатформ для дослідження сейсмічної вразливості споруд та елементів їх конструкцій.

					МД.ПМ71.25.000ПЗ	Арк.
						82
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## Список використаної літератури.

1. Устройство для калибровки и метрологической поверки цифровых сейсмических регистраторов [Электронный ресурс] . – Режим доступа: <http://www.igph.kiev.ua/FullVersion/2014/gj2/art21314.pdf>
2. Датчики перемещения и вибростенды [Электронный ресурс] . – Режим доступа: [http://www.r-sensors.ru/12\\_prod\\_displacement\\_ru.shtml](http://www.r-sensors.ru/12_prod_displacement_ru.shtml).
3. Стенд для испытаний и калибровки сейсмометрической аппаратуры / Г.Н Бугаевский, В.П. Белов, С.Д. Нестеренко // Строительство и техногенная безопасность. Сб.науч.тр, вып.5. Симферополь, КАПКС. —2001. — С.92-97.
4. Блок управления стендом для калибровки инженерно-сейсмометрической аппаратуры / В.Н. Агапов, А.А. Солошенко // Строительство и техногенная безопасность. — 2011. — Выпуск № 35. — С. 152–157.
5. CT-EW1 Calibration Table for broadband and short-period seismometers [Электронный ресурс] . – Режим доступа: [www.lennartz-electronic.de](http://www.lennartz-electronic.de).
6. The CT-EW1 Calibration Table // Document Number: 990-0062. Lennartz electronic GmbH.
7. Seismometer Calibration System PET-0A&PET-03H for calibration of Seismometers [Электронный ресурс] . – Режим доступа: <http://www.imv.co.jp/e/products/other/pet/>
8. Низкочастотный вибростенд [Электронный ресурс] . – Режим доступа: <http://patents.su/3-1070435-nizkochastotnyjj-vibrostand.html>
9. Афонин С.М. Об абсолютной устойчивости системы управления пьезодвигателем наноперемещений // Вестник машиностроения. 2001. №8. С. 19-22.
10. Афонин С.М. Структурно-параметрическая модель пьезодвигателя наноперемещений // Вестник машиностроения. 2001. №5. С. 29-33
11. Афонин С.М. Исследование и расчет многокоординатных пьезодвигателей наноперемещений // Вестник машиностроения. 2004. №8. С. 20-23.
12. Афонин С.М. Преобразование параметрических структурных схем пьезодвигателя наноперемещений // Вестник машиностроения. 2006. №3. С. 22-

		45.			МД.ПМ71.25.000ПЗ	Арк.
						83
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

13. H. Hu, H. M. S. Georgiou, R. Ben-Mrad. Enhancement of Tracking Ability in Piezoceramic Actuators Subject to Dynamic Excitation Conditions // IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS. 2005. V.10. N 2. P. 230-239.
14. P-239, P-244, P-245 Preloaded Open & Closed-loop Translators [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://www.piusa.us/fileadmin/user\\_upload/pi\\_us/files/product\\_datasheets/P239\\_247\\_Piezo\\_Stack\\_Datasheet.pdf](https://www.piusa.us/fileadmin/user_upload/pi_us/files/product_datasheets/P239_247_Piezo_Stack_Datasheet.pdf).
15. Шляхи вдосконалення сервопривода системи автоматичного фокусування станції лазерного запису [Електронний ресурс] . – Режим доступу: <http://dspace.nbuv.gov.ua/xmlui/bitstream/handle/123456789/50911/08-Britski.pdf;sequence=1>
16. Применение полупроводниковых цифровых интерферометров [Електронний ресурс] . – Режим доступу: <http://www.ipri.kiev.ua/fileadmin/XXXX/2012/2/2-9.pdf>
17. Integrated Temperature Controllers for Peltier Modules MAX1978. Technical description // Maxim Integrated Products. — 2010. Rev 3; 3/10.
18. Continuous Wave Laser Average Power Controller ADN2830 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/ADN2830.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADN2830.pdf).
19. HL6312G/13G, AlGaInP Laser Diodes. Opnext Japan, Inc. URL: <http://www.opnext.com/optodevice/>
20. Integrated Temperature Controllers for Peltier Modules MAX1978. Technical description // Maxim Integrated Products. — 2010. Rev 3; 3/10.
21. Теорія автоматичного управління / Г.Ф. Зайцев, В.К. Стеклов, О.І. Бріцький; За ред. проф. Г.Ф. Зайцева.- К.: Техніка, 2002.- 688 с.
22. Кирьянов В.П. Лазерные интерферометры перемещений / В.П. Кирьянов, В.П. Коронкевич // Автометрия. — 1998. — № 6. — С. 65–84.
23. Матеріали розробки та досліджень вібростенда ІПРІ НАН України. На правах рукопису. – 2013.

					МД.ПМ71.25.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		84